Niveau(x) d'enseignement : 4 Numéro EDUQ : 9270828
Centre d'intérêt : 845

Janvier, Claude.

Rapport de recherche : systèmes à rétroaction, représentations, jeu interactif et expérimentation / par Claude Janvier et Claudine Mary. -- Montréal : Université du Québec à Montréal, Centre interdisciplinaire de recherche sur l'apprentissage et le développement en éducation, 1991.
111 p. : ill. ; 29 cm.

Résumé : p. [3]. Bibliogr. : p. 67-68.

Vedette(s)-secondaire(s) : Mary, Claudine • Université du Québec à Montréal. Centre interdisciplinaire de recherche sur l'apprentissage et le développement en éducation

Descripteur(s) : Ecologie • Système • Logiciel • Secondaire (Ordre d'enseignement)

Identificateur(s) de sujet : Ecosystème

Les systèmes, exigeant des mathématiques avancées, ne sont souvent introduits qu'indirectement dans les cours d'écologie. Ce rapport analyse la notion d'écosystème en tant que système à rétroaction sous l'angle des représentations servant à le définir. La compréhension du système à rétroaction y est présentée comme résultant d'une utilisation efficace et coordonnée des différentes représentations de l'évolution de ce système permettant, entre autres, de caractériser son évolution. On y décrit un logiciel interactif permettant aux élèves d'introduire des perturbations dans un système en évolution et d'en juger les conséquences. On présente ensuite des résultats d'expérimentation de ce logiciel avec des élèves du secondaire en écologie. Il en ressort que: 1) le logiciel s'avère un instrument intéressant pour introduire chez les élèves la notion de systèmes; 2) l'apprentissage que peuvent réaliser les élèves est limité par leur compétence à utiliser les graphiques; 3) le contexte du logiciel initie les élèves à la notion fondamentale d'équilibre dynamique dont la maîtrise est inégalement assurée selon les représentations graphiques utilisées.

Type de document :

9270828

CENTRE INTERDISCIPLINAIRE DE RECHERCHE SUR
L'APPRENTISSAGE ET LE DEVELOPPEMENT EN EDUCATION

CIRADE

Université du Québec à Montréal

9270828

Rapport de recherche: systèmes à rétroaction, représentations, jeu interactif et expérimentation

par Claude Janvier et Claudine Mary
Université du Québec à Montréal
CIRADE

Septembre 1991

MEMBRES DE L'ÉQUIPE

Responsable du projet:	Claude Janvier
Chercheur:	Maurice Garançon
Assistante de recherche:	Claudine Mary
Étudiante 2e cycle:	Sophie René de Cotret
Étudiants 1er cycle:	Danielle Malenfant
	Steeve Lemay
	Jean-Stéphane Giguère
	Michel Lamontagne
Programmeur:	Luc Jacob
Stagiaire:	Madeleine Vachon

REMERCIEMENTS

Cette recherche a été subventionnée par les Fonds F.C.A.R., du ministère de l'éducation du Québec, et par l'U.Q.A.M. par l'intermédiaire du P.A.F.A.C.C. Elle a été réalisée grâce à la participation de nombreuses personnes. Nous voulons remercier tous les étudiants de l'U.Q.A.M. qui y ont pris part. Nous adressons un merci tout spécial à notre programmeur, Luc Jacob, et au personnel du CIRADE, pour leur assistance professionnelle. Nous voulons également souligner la collaboration du Collège Stanislas et de l'École Pierre-Dupuy: merci aux enseignants et à leurs élèves sans qui cette recherche n'aurait pu être possible. Finalement, nous adressons nos remerciements à AMIGA qui nous a généreusement prêté quatre micro-ordinateurs.

RÉSUMÉ

La notion de système est omniprésente dans le monde qui nous entoure d'où, son importance dans les programmes scolaires. Cependant, exigeant des mathématiques avancées, les systèmes ne sont souvent introduits qu'indirectement dans les cours d'écologie.

Ce rapport analyse la notion d'écosystème en tant que système à rétroaction sous l'angle des représentations servant à les définir. La compréhension du système à rétroaction y est défini comme résultant d'une utilisation efficace et coordonnée des différentes représentations de l'évolution de ce système permettant entre autres, de caractériser son évolution.

Il décrit un logiciel interactif permettant aux élèves d'introduire des perturbations dans un système en évolution et d'en juger les conséquences. Il les compare à d'autres logiciels ayant des objectifs semblables.

Il présente des résultats d'expérimentations de ce logiciel avec des élèves du secondaire. Il en ressort que 1) le logiciel s'avère un instrument intéressant pour introduire chez les élèves la notion de systèmes; 2) l'apprentissage que peuvent réaliser les élèves est limité par leur compétence à utiliser les graphiques; 3) le contexte du logiciel initie les élèves à la notion fondamentale d'équilibre dynamique dont la maîtrise est inégalement assurée selon les représentations graphiques utilisées.

DESCRIPTEURS

Système
Écologie
Enseignement
Rétroaction
Écosystème
Représentation
Logiciel
Interaction
Diagramme de phase
Graphique multi-courbes

TABLE DES MATIÈRES

PAGES

1. **INTRODUCTION** 6
   a) Objectifs 6
   b) Bref historique 6
   c) En résumé 9

2. **PERTINENCE, PROBLÉMATIQUE ET CADRE THÉORIQUE** 9
   a) Introduction 9
   b) Écosystèmes et représentations graphiques: compréhension versus représentation 10
   c) Rétroaction: équilibre et régulation 11
   d) Exemple type: les lièvres et les lynx 12
   e) Rétroaction et diagramme causal 13
   f) Rétroaction et diagramme de flux 17
   g) Évolution et graphique multi-courbes 21
   h) Évolution et diagramme de phase 23
   i) Difficultés de compréhension des écosystèmes 25
   j) Voie vers la compréhension 26

3. **INSTRUMENT MÉTHODOLOGIQUE: DIDACTICIEL METTANT À PROFIT UNE REPRÉSENTATION DYNAMIQUE ET VISUELLE DE L'ÉVOLUTION D'UN ÉCOSYSTÈME** 27
   a) Introduction 27
   b) Présentation du jeu 28

4. **PREMIÈRE EXPÉRIMENTATION** 31
   a) Objectifs 31
   b) Sujets 32
   c) Méthodologie 33
   d) Présentation du diagramme de phase 35
   e) Modalité de participation des sujets et contexte de jeu: premières constatations 36
   f) Résultats de la première expérimentation et conclusions 37

5. DEUXIÈME EXPÉRIMENTATION 40
a) Entrevues en secondaire I 40
b) Le jeu de la stabilité 43
c) La version diagramme de phase du jeu 44
d) Sujets, méthodologie et objectifs 45
e) Résultats de la deuxième expérimentation et conclusions 47

6. AUTRES RÉSULTATS: PREMIÈRE ET DEUXIÈME EXPÉRIMENTATIONS (Secondaire I, III et V) 52
a) Le contexte 52
b) Les catastrophes 56
c) Les valeurs numériques (gestion de l'entreprise) 57
d) L'évolution du système et la rétroaction 59

7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS 62
a) Utilisation du jeu en classe 62
b) Compréhension des systèmes à rétroaction et potentialités de notre approche 62
c) La modélisation 63
d) Conclusions et suites à donner 65

BIBLIOGRAPHIE 67

APPENDICES 69
1. Le modèle de Lotka-Volterra 70
2. Module de présentation du diagramme de phase 72
3. Séance de présentation du contexte écologique en secondaire V 92
4. Questions de fin d'expérimentation en secondaire III 97
5a. Stratégies en secondaire III 98
5b. Stratégies de chacune des équipes de secondaire III pour l'ensemble de l'expérimentation 104

1. INTRODUCTION

a) Objectifs

- **Objectifs initiaux** (F.C.A.R.)
  Dans la demande de subvention F.C.A.R., lors de la formulation du projet, nous nous étions fixés quatre objectifs:

  1) Mettre en évidence les difficultés générales (appartenant en propre à la nature des systèmes) et les difficultés particulières reliées aux disciplines faisant obstacle à la compréhension des systèmes à rétroactions.
  2) Étudier comment une analyse du réseau d'interrelation dirigée par un didacticiel interactif favorise cette compréhension.
  3) Examiner en quoi la réalisation de simulations (de type jeu) amène une meilleure compréhension de tels systèmes.
  4) Réaliser une typologie des systèmes.

- **Objectifs finaux**
  Après deux ans de travail, nous nous sommes finalement concentrés autour des objectifs 1 et 3 et nous avons demandé un financement ad hoc P.A.F.A.C.C. pour réaliser les étapes suivantes:

  1' Mettre sur pied une étape minimale de préexpérimentation pour ensuite établir les cadres d'expérimentation à l'école.

  2' Préparer une forme d'enseignement auprès de groupes-classes, enseignement en particulier du diagramme de phase comme support au jeu.

  3' Observer des élèves à l'oeuvre avec le didacticiel selon des objectifs spécifiques d'expérimentation.

  4' Dépouiller les protocoles d'expérimentation obtenus pour faire ensuite une synthèse des résultats obtenus.

  5' Rédiger ce présent rapport.

b) Bref historique

- **Travaux préliminaires**

  Le projet qui s'achève résulte de préoccupations auxquelles fut conduit le chercheur

principal par une recherche antérieure portant sur le rôle du dynamisme dans la représentation graphique en sciences. C'est, en effet, à cette occasion qu'il fut amené à formuler, dans le prolongement des travaux de BERTIN (1967), une classification des diagrammes utilisés en sciences. Les systèmes apparaissaient dans une catégorie à part, parmi les réseaux. Fut également déterminant dans le cheminement de l'équipe le mémoire de Catherine Girardon portant sur les représentations de la notion de transformation. Évidemment, la thèse de doctorat du chercheur principal préparait l'équipe à aborder une grande partie des questions que le projet soulevait. Cependant, l'élément déclencheur fut la rencontre à Bengalore (INDES) de Claude Janvier avec Gerhard Schaeffer, didacticien en biologie de Hambourg (Allemagne). Cette rencontre l'a amené à mieux cerner le rôle du diagramme causal comme amorce à l'interprétation des diagrammes multi-courbes décrivant la fluctuation des différents éléments d'un système.

Le projet s'est étendu sur trois ans. Formulation du projet: octobre 1986, réalisation: juin 1986 - juillet 1989. La quatrième année a surtout servi à améliorer le logiciel, rédiger le présent rapport et à préparer une conférence présentée par Claude Janvier à Milton Keynes dans le cadre d'un symposium organisé par l'OTAN.

- **1re année (1987-1988)**

Rapidement, il est devenu évident que le didacticiel interactif de simulation envisagé dans la formulation du projet initial n'aurait aucune portée pédagogique tant il était complexe au point de vue visuel. Ce didacticiel visait à présenter d'une manière dynamique, à partir des relations déterminées par le diagramme causal, comment évolue les populations de proies et de prédateurs, en plaçant des colonnes de longueurs variables sur les éléments et en utilisant la taille des flèches pour montrer la fluctuation dans les interactions. C'est alors qu'une formulation différente fut élaborée, sans flèche. Les rencontres jusqu'à février 1987 furent utilisées à l'élaboration du didacticiel basée sur une animation de couleurs et de colonnes simulant les fluctuations des populations d'un système écologique. De février à juin, le travail s'est porté sur les travaux de Forrester et sa représentation (pour fins de simulation) reprise avec des variantes dans le livre «Le Macroscope» de Joël de Rosney. Un soin minutieux fut apporté à une étude comparative des différentes représentations des systèmes à rétroactions; ce qui nous révéla le diagramme de phase comme fondamental pour la compréhension de tels systèmes. La préparation de la présentation à P.M.E. à Montréal en juillet 1987 a amené l'équipe à s'interroger sur les objectifs 1 et 4 et à préparer ce qui est devenu le module de calcul de l'actuel didacticiel. L'équipe pouvait alors compter sur un logiciel d'animation (construit par Maurice Garançon) qui montrait dans un plan cartésien et sur un diagramme de phase l'évolution des populations d'un couple proie-prédateur, selon le modèle de LOTKA-VOLTERRA.[1] La programmation initiale du didacticiel fut réalisée par des étudiants dans le cadre du cours: INM5000. Le langage «C»

[1] Les équations de LOTKA-VOLTERRA sont données en appendice 1.

fut choisi comme mieux adapté à l'ordinateur AMIGA, don du F.C.A.R., pour le projet. Dès le début la couleur pose des ennuis. Mais tranquillement la conception du didacticiel se précise ainsi que la notion de compréhension, bien que les problèmes avec l'affichage des couleurs restent entiers.

- **2e année (1988-1989)**

La rédaction d'un article par Claude Janvier et Maurice Garançon pour la revue FOCUS fut l'occasion idéale pour faire le point et répondre à plusieurs questions élaborées dans la problématique. Également d'importance furent plusieurs conférences et communications présentées en Europe par Claude Janvier. À Genève, la rencontre avec Bruno Vitale a permis de bien situer la simulation de type ludique par rapport à celle émanant d'un programme d'ordinateur rédigé par les étudiants. La rencontre avec Christian Souchon à Paris VII a révélé plusieurs dimensions écologiques du projet. Cette année-là nous nous sommes adjoints la collaboration de Luc Jacob, programmeur pour AMIGA. Des problèmes informatiques ont été résolus mais les progrès sont restés lents. Entre autres, l'année se termina sans que ni le contrôle de la couleur, ni l'accès aux variables réglant les grandes fonctions du didacticiel soient acquis. Maurice Garançon en l'absence de Claude Janvier (en congé sabbatique) assuma la responsabilité du projet. Ce dernier est cependant revenu trois fois à l'U.Q.A.M. pour travailler avec l'équipe. Claudine Mary a oeuvré plus particulièrement sur les représentations graphiques des systèmes et sur la conception de l'unité d'enseignement de la notion de diagramme de phase.

- **3e année (1989-1990)**

Une subvention ad hoc du P.A.F.A.C.C. nous a permis de mener à terme la recherche. Elle fut essentiellement consacrée à l'expérimentation du jeu avec la mise au point de l'unité d'enseignement, la conception d'une grille d'observation des élèves à l'oeuvre et d'une grille synthèse pour le dépouillement des protocoles d'observation. Nous avons réalisé deux expérimentations.

Une étape importante fut les modifications proposées au didacticiel d'exploration, alors que la première expérimentation avait montré la nécessité d'une réorientation majeure. Luc Jacob a réalisé deux nouveaux jeux qui ont donné lieu à une deuxième expérimentation en classe.

La planification à l'école n'a pas été aisée: pouvoir disposer d'un groupe d'élèves pour une période de cours reste difficile. Par ailleurs, arriver avec six micro-ordinateurs dans un local pose des problèmes d'installation. Nous avons finalement eu la collaboration de classes de secondaires I et V, pour la première expérimentation, et de secondaire III,

pour la deuxième. Nous avons pu ainsi réaliser les observations requises pour le projet, non toutefois sans quelques imprévus (panne d'électricité et heures prévues pour l'expérimentation déplacées après la classe, avec la bonne volonté des élèves). La plus grande partie de ce rapport porte sur ce qui a été réalisé durant cette dernière année.

c) En résumé

Les objectifs initiaux de notre recherche nous ont permis d'établir notre cadre théorique. Le didacticiel est le résultat d'une réflexion et d'une recherche sur les difficultés liées aux systèmes à rétroaction et est principalement le fruit d'une analyse des différentes représentations de ces systèmes. Notre jeu se veut une représentation permettant l'*exploration* d'un système particulier. Aux objectifs d'expérimentations s'ajoute celui qui consiste à chercher jusqu'à quel point notre jeu favorise cette exploration et comment la favoriser au maximum.

Bien que le présent projet n'ait pas permis de réaliser une typologie des systèmes pour fins didactiques (objectif 4), il a cependant conduit à un travail situant les systèmes à rétroaction par rapport aux systèmes dynamiques (voir page 7c, La modélisation). Par ailleurs, les conclusions mettent bien en évidence (et expliquent) les difficultés faisant obstacle à la compréhension des systèmes à rétroaction. Le logiciel conçu favorise une analyse du réseau des interrelations entre variables des systèmes (objectif 2). Il tombe dans la catégorie des simulations de type jeu qui permet aux étudiants une meilleure compréhension des systèmes à rétroaction (objectif 3) tout en permettant aux chercheurs une analyse des difficultés rencontrées (objectif 1). Quant aux objectifs finaux complémentaires (objectifs 1' à 5'), ils ont été réalisés dans leur intégralité.

2. PERTINENCE, PROBLÉMATIQUE ET CADRE THÉORIQUE

a) Introduction

Un système est communément défini comme étant un ensemble de parties ou de variables interreliées les unes avec les autres et obéissant à un but plus ou moins explicite. Une centrale nucléaire, l'économie d'une région ou les variations de populations vivant dans un milieu spécifique sont des exemples de systèmes. Les systèmes cardio-vasculaire, respiratoire et hormonal, pour ne nommer que ceux-là, en sont aussi des exemples. Aujourd'hui, la plupart des élèves du secondaire sont introduits assez tôt aux systèmes par l'intermédiaire des écosystèmes. Il s'agit de populations d'animaux ou de végétaux vivant dans un milieu spécifique et étant reliés entre eux par des relations proie-prédateur. Les écosystèmes ont l'avantage d'impliquer des parties ou variables qui peuvent être correctement appréhendées par une vaste majorité d'élèves du secondaire même si la notion

de population n'est pas aussi primitive qu'on voudrait le croire (cf. 2i de ce rapport). De plus, les élèves sont relativement familiers avec les relations qui sont impliquées dans de tels systèmes. **Ces caractéristiques font des écosystèmes les candidats idéaux pour servir de paradigmes à une grande variété de systèmes. C'est pourquoi, au cours des années, nous avons progressivement focaliser notre attention sur eux, même si au départ nous nous intéressions aux systèmes à rétroaction en général.**

b) Écosystème et représentations graphiques: compréhension versus représentations

Les systèmes sont en général trop complexes pour permettre une analyse qui prenne en considération tous les facteurs qui sont déterminants. Leur étude ne peut s'effectuer qu'à travers des modèles qui font une sélection des facteurs impliqués et des relations hypothétiques qui les unissent. Le système est alors assimilé à son modèle qui doit refléter de différentes manières des caractéristiques identiques à celles du système. Du modèle, on fait des représentations. On représente les relations qui décrivent le système (ou plutôt le modèle) et on représente l'évolution du système (du modèle) qui découle de ces relations.

Pour nous, comprendre un système à rétroaction s'assimile à pouvoir en donner les caractéristiques, c'est-à-dire pouvoir décrire les relations entre les variables, en décrire l'évolution et éventuellement prédire le comportement du système lorsque soumis à une perturbation. Ces descriptions se font via un modèle dont on fait des représentations.

Notre modèle de base pour toute notre analyse et pour le didacticiel que nous-mêmes avons conçus est celui de Lotka-Volterra (cf. Appendice 1). Notre préoccupation est donc la compréhension de la rétroaction de ce modèle. Par ailleurs, comprendre la rétroaction n'est pas indépendante des représentations qu'on se fait du modèle. Et ceci était au départ de notre problématique. Notre conviction était (et reste) que comprendre un système à rétroaction consiste à pouvoir utiliser de façon efficace les différentes représentations d'un modèle particulier pour arriver à caractériser l'évolution du système.

Une partie de notre travail a donc consisté à étudier les différentes représentations d'un système à rétroaction. Il y a les représentations qui donnent les relations [diagramme causal, diagramme en mots, diagramme à la Forrester] et celles qui décrivent l'évolution du système [multi-courbes, diagramme de phase, notre didacticiel et diagramme de Forrester animé (Stella)]. Dans les paragraphes qui suivent nous ferons une analyse de ces différentes représentations. Mais avant, passons par une représentation d'un niveau simple de rétroaction, pour insister sur deux notions fondamentales ici: la régulation et l'équilibre dynamique.

c) Rétroaction: équilibre et régulation

On a rétroaction quand dans un système une variable agit sur elle-même par l'intermédiaire d'autres variables. Dans un écosystème, on a des prédateurs qui dépendent de proies, qui dépendent à leur tour d'autres proies et ainsi de suite. Ainsi, les prédateurs en capturant des proies entraînent une **diminution de la population des proies**. Mais les proies en diminuant réduisent la nourriture des prédateurs qui ainsi diminuent en nombre. Moins de prédateurs entraînent une **augmentation du nombre de proies**.[2] Manger les proies a des conséquences sur la population des proies mais aussi, par rétroaction justement, sur la population des prédateurs. La notion de rétroaction suppose celle d'équilibre.

Supposons une des variables fixes, les proies. On peut alors emprunter à de Rosney (1975) le diagramme en mots qui suit pour expliquer ce qui se passe pour une seule population.[3]

FIGURE 1

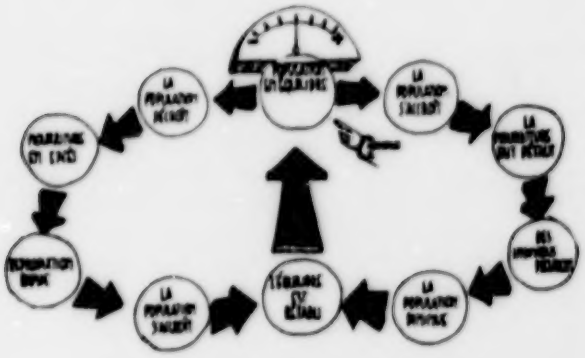


DIAGRAMME DE DE ROSNEY

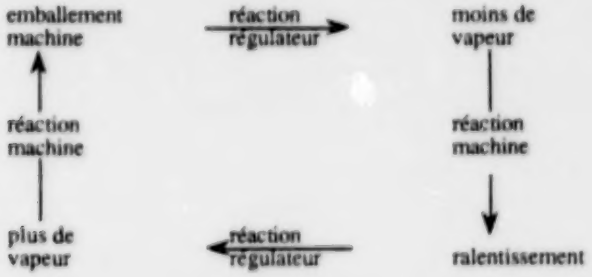
Ce diagramme n'implique qu'une variable et ne traduit donc pas la relation proies-prédateurs. Cette représentation du système n'est pas adéquate pour expliquer les relations

2 Cette suite d'inférences sera explicitée plus loin.

3 Nous avons supprimé du diagramme original des dessins accessoires.

entre deux variables, mais elle met bien en évidence les notions d'équilibre et de régulation qui sont liées à celle de rétroaction. Dans le système proies-prédateurs justement, une des variables agit sur l'autre comme régulateur, tout comme dans l'exemple maintenant classique du régulateur centrifuge de Watt et de la machine à vapeur qu'il contrôle.

Le régulateur centrifuge de Watt comprend une partie mobile qui, fixée à l'arbre de la machine, est entraînée par son mouvement de rotation. Cette partie mobile est reliée par des tiges à une trappe qui en s'ouvrant ou se fermant favorise ou freine l'entrée de la vapeur. Tout emballement ou ralentissement résultant d'un changement de charge est donc contrebalancé. Un diagramme «en mots» permet de schématiser ce qui se passe:



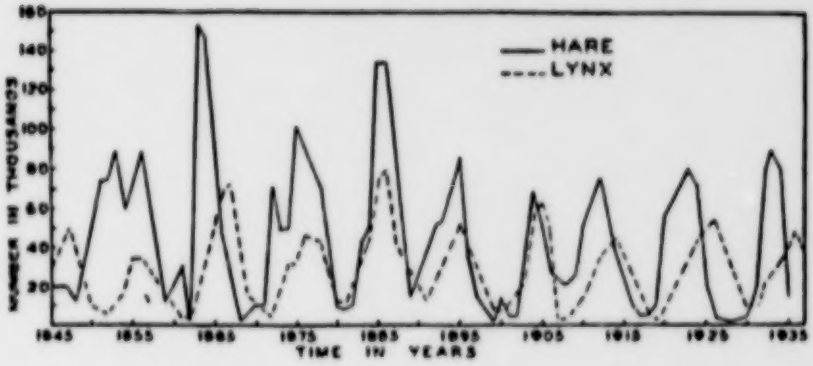
Il y a donc les rétroactions où un élément est introduit pour contrôler le niveau d'une variable. Ce sont des systèmes simples où la valeur de la variable tend vers un but fixé d'avance qui est atteint selon un pattern connu d'avance: la machine de Watt en est un exemple, de même la température d'une pièce et son thermostat (le régulateur). Il y a, à un autre niveau, les rétroactions de type proies-prédateurs: on a là deux populations qui, pendant qu'elles obéissent à des lois de croissance internes qui leur sont propres, agissent l'une sur l'autre. La caractérisation de ces systèmes est plus difficile à réaliser. Nous en avons fourni une description brève au premier paragraphe de cette section. Nous explicitons maintenant le modèle proies-prédateurs.

d) Exemple type: les lièvres et les lynx

Prenons l'exemple simple et maintenant classique des lynx et des lièvres du nord canadien; exemple souvent proposé aux élèves dans leur premier cours d'écologie.

La compagnie de la Baie d'Hudson a fait le décompte des peaux de lièvres et de lynx trappées par les coureurs des bois sur un siècle. Les populations de lièvres et de lynx vivant alors sont supposées proportionnelles aux nombres d'animaux tués. Ces données sont transcrites dans le graphique multi-courbes ci-dessous montrant ainsi l'évolution des deux populations simultanément.

FIGURE 2



GRAPHIQUE DE LA BAIE D'HUDSON

(Tiré de ODUM, E., P.: Fundamentals of Ecology. W.B. Saunders Co. (1968), 2nd edition)

Ce système des lièvres («hare») et des lynx nous servira d'exemple à travers l'étude des différentes représentations d'un système.

On a donc deux populations qui varient sous l'influence l'une de l'autre. Le graphique révèle des augmentations et des diminutions de chacune des populations. De plus, ces variations respectent une certaine régularité. On peut constater des cycles d'environ une dizaine d'années. Cette représentation est particulièrement appropriée lorsqu'on veut donner le portrait de l'évolution de deux populations sur une période donnée. Mais, le graphique n'est pas facile à interpréter pour qui n'en a pas la clé. En effet, **les deux courbes doivent être interprétées simultanément et chaque courbe l'une en fonction de l'autre**. Et, l'interprétation simultanée suppose qu'on introduise et des relations de cause à effet et un temps. Une de nos préoccupations didactiques, dès le début de cette recherche, fut de conjuguer ce type de graphique, le multi-courbes, avec ce qu'on appelle généralement le diagramme causal (la clé). Ce diagramme schématise la rétroaction entre deux variables.

e) Rétroaction et diagramme causal

Le diagramme causal fournit grossièrement les relations entre les variables lynx (les prédateurs) et lièvres (les proies). Le diagramme ci-dessous a deux flèches marquées en

leur pointe d'un signe «+» ou «-» selon le sens des changements des deux populations, dans le même sens (+) ou dans le sens opposé (-).

FIGURE 3

DIAGRAMME CAUSAL

Le diagramme peut se traduire en mots de la façon suivante:

1) Une augmentation des lièvres entraîne une augmentation des lynx (de même une diminution des lièvres entraîne une diminution des lynx).
2) Par contre, un accroissement des lynx entraîne une diminution des lièvres (de même une diminution des lynx entraîne une augmentation des lièvres).

Ce diagramme illustre deux «boucles à rétroaction». L'une d'elles montre l'effet des lièvres sur eux-mêmes par l'intermédiaire des lynx: par exemple, une augmentation des lièvres entraîne une augmentation des lynx qui entraîne une diminution des lièvres. L'autre montre l'effet des lynx sur eux-mêmes par l'intermédiaire des lièvres. Le comportement d'une population à un moment donné dépend de son comportement l'instant précédent.

La bouche à rétroaction a un effet stabilisateur sur la variable concernée. En effet, par l'intermédiaire des lièvres, une augmentation des lynx entraîne une diminution des lynx et inversement. De même, par l'intermédiaire des lynx, une augmentation des lièvres entraîne une diminution des lièvres et inversement. On parle alors de rétroaction négative. Les proies agissent comme régulateur des prédateurs et ceux-ci comme régulateur des proies.

Le diagramme causal constitue une première étape d'analyse des systèmes à rétroaction **à deux variables**: il fournit les relations du système (tel que modélisé) et il cristallise schématiquement la notion de boucles à rétroaction. Il fournit ainsi une clé pour interpréter le graphique multi-courbes. Ainsi, on peut associer aux relations du diagramme causal des régions du diagramme multi-courbes comme le montre la figure ci-dessous.

FIGURE 4

Le diagramme causal permet d'introduire une relation de cause à effet et de donner ainsi une clé de lecture. Toutefois, le diagramme de la figure 3 ne permet pas d'expliquer comment se fait le passage de la croissance à la décroissance des populations (les points tournants sur le graphique). En fait, il s'agit non pas de la croissance ou de la décroissance des populations mais de **l'augmentation ou de la diminution de leur taux d'accroissement**. Il faut donc prendre en considération le taux de variation propre de chacune des populations lorsque laissée à elle-même.

Le diagramme 3' augmenté de deux flèches supplémentaires, tient compte d'un facteur de reproduction pour les lièvres et d'un facteur malthusien pour les lynx. On suppose que les lynx ne vivent pratiquement que des lièvres et que ceux-ci ont de la nourriture en abondance et que leur territoire est illimité.

FIGURE 3'

DIAGRAMME CAUSAL

Le système se voit ainsi augmenté de deux nouvelles boucles à rétroaction. À gauche, est schématisée une boucle à rétroaction négative: une augmentation de la population des lynx amènera une plus grande augmentation des décès, puisque le taux de décès sera appliqué à une plus grande population, et donc une diminution de la population. À droite, est schématisée une boucle à rétroaction positive: une augmentation des lièvres amènera une augmentation encore plus grande de la population des lièvres puisque le taux de croissance sera appliqué à une plus grande population.

Chaque flèche du diagramme causal de la figure 3', nous donne une relation que nous traduisons maintenant comme suit:

1) Les lièvres laissés à eux-mêmes verront leur population augmenter à un taux constant de façon telle qu'ils connaîtront une croissance exponentielle.
2) Les lynx laissés à eux-mêmes verront leur population décroître à un taux constant (décroissance exponentielle) jusqu'à leur disparition.
3) Le taux de croissance normal des lièvres décroîtra (augmentera) avec toute croissance (décroissance) de la population de lynx.
4) Le taux de croissance normal de la population des lynx augmentera (décroîtra) avec toute croissance (décroissance) de la population des lièvres.

Le diagramme de la figure 3', colle parfaitement au modèle de Lotka-Volterra (cf. appendice 1). Par ailleurs, il explique l'évolution du système des lièvres et des lynx telle qu'elle est décrite par le relevé de la Baie d'Hudson. La notion de modèle sous-jacent est ici fondamentale ce que nous n'avions pas estimé avec autant de pertinence au début de la recherche. Le diagramme causal est ce que nous appelons une **représentation de caractérisation** ou de définition des relations du système par opposition aux **représentations d'évolution** telles le graphique multi-courbes ou le diagramme de phase que nous analyserons subséquemment. C'est à partir des représentations de caractérisation que se construit le modèle et que sont établies ici les équations de Lotka-Volterra. La validité du modèle est jugée toutefois à l'aide des **représentations d'évolution** du système qu'on obtient en résolvant les équations, en faisant tourner un programme ou par tout autre moyen permettant d'actualiser cette évolution.

Le relevé de la Baie d'Hudson, comme tout autre relevé dérivant d'une technique d'échantillonnage ou de mesure, donne une **image de la réalité**, image qui devient pour la plupart des gens la réalité. Pour juger de la validité d'un modèle, il suffit de comparer l'évolution du système modélisé à l'évolution du système en réalité, d'après l'image qu'on a de cette réalité, bien évidemment tout en sachant que la réalité c'est encore autre chose. Dans le processus de construction d'un modèle, trois types de représentations sont donc en jeu: **celles de caractérisation** desquelles on tire le modèle et qui consiste toujours à établir des relations spécifiques entre les parties; **celles d'évolution du système** telle que nous la fournit le modèle à travers des formules, des tableaux, des graphiques ou autre

moyen d'enregistrement des changements temporels des parties de ce système et, finalement, pour fin de validation, **celles qui représentent le vrai système** ou ce qu'on peut croire être près de la réalité.

Toute notre approche est basée sur l'idée que les représentations d'évolution de modèles peuvent être explorées avant même que des représentations de caractérisation soient construites et développées. Notre «jeu» se situe parmi ces représentations d'évolution; **le diagramme de flux que nous présentons maintenant est à la frontière des représentations de caractérisation et de celles d'évolution**.

f) Rétroaction et diagramme de flux

Jay Forrester a développé pour fin de simulation un diagramme particulier qui en même temps que de donner les boucles à rétroaction, donne une représentation des deux types de variables en jeu: les variables de niveaux (les populations pour ce qui nous concerne) et les variables de flux (les taux de variations). Le diagramme de flux, comme on l'appelle, montre un réservoir troué alimenté par une source et dont les pertes s'écoulent vers un «puits». Le flux de ce qui arrive ou de ce qui sort est variable. Le niveau du réservoir représente l'état de la variable étudiée (une population par exemple). Le niveau au temps t est alors donné à partir du niveau au temps t-1 auquel s'ajoute ce qui arrive de la source moins ce qui sort du réservoir, pendant la période de temps entre les deux mesures. Le diagramme de flux illustre les effets des variations sur la variable d'état, dite d'accumulation par opposition aux variables du diagramme causal qui sont des taux de variation (ou des dérivées dans les équations de Lotka-Volterra).

Le diagramme ci-dessous présente les symboles iconiques utilisés par Forrester. Il est tiré de «Le Macroscope» de Joël de Rosney (p. 98). La figure 5, quant à elle est adaptée d'une illustration de Bertrand Braunschweig tirée de «La simulation sur micro-ordinateur: les modèles dynamique des systèmes» (p. 50). Il reprend en diagramme de flux, avec l'iconographie de Forrester, le système lynx-lièvre dont les relations sont illustrées par le diagramme causal de la figure 3'.

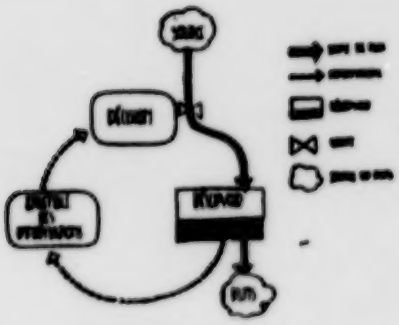


DIAGRAMME DE FLUX

Le réservoir est donc le lieu (symboliquement parlant) où s'accumule la variable étudiée (les populations de lièvres ou de lynx). Les flèches noires sont des réseaux de communication sur lesquelles voyagent les flux qui font baisser ou monter le niveau des réservoirs: le flux des lièvres et celui des lynx de notre écosystème. Sur les flèches pointillées circulent des informations: mesures de niveau du réservoir, rapport proies-prédateurs, facteur de reproduction, facteur malthusien, ... Tel que décrit par de Rosney, ce schéma se veut la représentation d'un modèle général de système. Il en parle comme d'*«un meccano symbolique» permettant de construire les modèles de différents systèmes et de mieux comprendre le rôle des interactions* (De Rosney, p. 96). Dans ce schéma-modèle, les informations passent par des centres de décision, les vannes. Là, elles sont transformées en actions (ouvrir ou fermer) ce qui a comme résultat d'agir sur les flux. La boucle de rétroaction se trouve dans le trajet information - décision - action - nouvelle information (détection des effets) - correction - action - effets, etc. Les effets se mesurent sur le niveau des réservoirs et sont renvoyés en information au centre de décision.

FIGURE 5

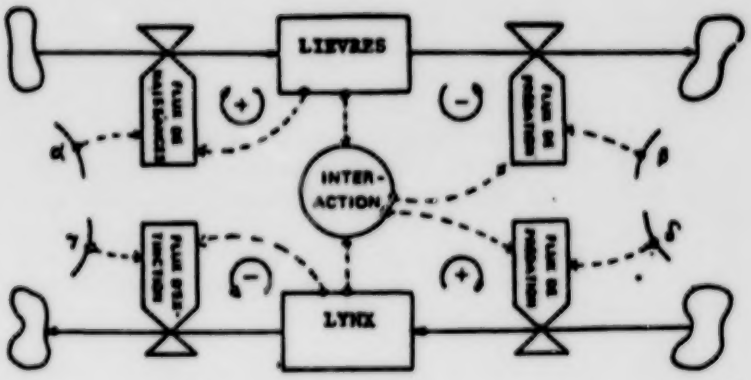


DIAGRAMME DE FLUX
Lièvres/Lynx

Par exemple, dans la figure 5, on retrouve les boucles suivantes, l'une positive et l'autre négative: plus le facteur de prédation est grand (plus grand est ouverte la vanne prédation pour les prédateurs), meilleur se porte la population des lynx (boucle positive) et (plus grand est ouverte la vanne prédation des proies) moins bien se porte la population des lièvres (boucle négative).

Supposons une situation où le rapport lynx/lièvres se trouvent considérablement diminué à cause d'une chasse abusive (mesure des lynx dans le réservoir/mesure des lièvres dans le réservoir). Il s'ensuit (par «décision» ou autorégulation) une fermeture de la vanne prédation des lièvres; le flux de morts par prédation diminue, le niveau des lièvres augmente (ou diminue moins), la vanne des naissances s'ouvre, le flux qui alimente le réservoir augmente, et ... Et on peut continuer en faisant fonctionner le système à travers la suite information - décision - action - effet - information - ... On peut adjoindre à ce diagramme des valeurs numériques pour les différents paramètres impliqués (facteur de reproduction, taux de décès, ...), calculer à chaque fois l'état de la population et ainsi suivre l'évolution du système pas à pas. Même si Forrester utilise une autre représentation à cette étape, le diagramme est opérationnel.

Le diagramme donne les relations entre les différents éléments du système et met en évidence les boucles à rétroaction (de manière différente du diagramme causal). La représentation permet de caractériser le système mais il se rapproche pour ce qui vient d'être

dit d'un diagramme d'évolution (avec l'ensemble des états par lequel passe le système). On s'imagine aisément une version animée de ce même diagramme avec le niveau qui monte ou descend lorsque s'ouvrent ou se ferment les vannes et que s'écoule le fluide. Le diagramme de flux ou dynamique, comme on l'appelle aussi, a la particularité d'intégrer le temps et ses qualités principales sont ses aspects (justement) dynamique et interactif, qualités qui n'ont pas manquées de nous inspirer.

Les images de la représentation utilise une analogie qui suggère un mouvement physique. Mais aussi les informations qui circulent, les voies de communication, les centres de décisions, montrent des caractéristiques qui restent dynamiques en intégrant tout à la fois une dimension d'interactivité. Nous pouvons nous imaginer nous-mêmes agents de contrôle des flux. Par exemple, quoi faire si, devant une catastrophe écologique, nous, décideurs, sommes appelés à intervenir? «Fermer la vanne prédation des proies» peut alors consister à protéger des populations de proies.

Le diagramme de flux a été conçu pour les besoins des programmeurs. Il accompagnait un langage de programmation, DYNAMO. Sous-jacent aux travaux de Forrester et de son équipe du MIT, il y avait la cybernétique et la théorie des systèmes. De Rosney a utilisé le diagramme à des fins didactiques pour grand public, comme modèle de système. Avec le logiciel STELLA, il est maintenant possible de l'utiliser en classe. Ce logiciel, grâce à la technologie de Macintosh, permet de construire des diagrammes de flux et d'explorer les relations entre les variables du système. On peut y voir varier le niveau des réservoirs, pendant qu'une aiguille indique l'intensité du flux variable.

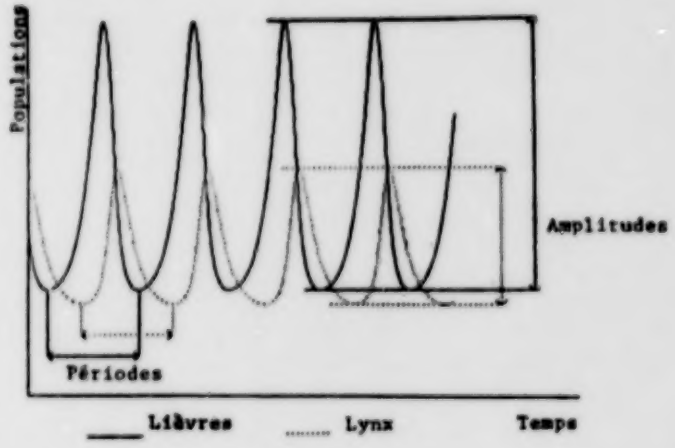
Horst Schecker rapporte que ce logiciel a donné des résultats intéressants dans l'enseignement de la physique au niveau collégial. Robert F. Tinker est cependant moins positif. Des élèves du secondaire (high school), il dit: *«One of the surprising results of the project is that flow diagrams are not as easily grasped as we had hoped. The two types of variables (algebraic and integral) are not easily distinguished by naïve students, even when they are given the more descriptive names, rates and levels»*. Il apparaît que ce diagramme, comme représentation de caractérisation, n'est pas d'accès immédiat, entre autres, en raison d'une symbolique lourde. De plus, il apparaît trop près et trop différent à la fois des représentations d'évolution. Tinker conclut qu'il faut prévoir pour les étudiants une étape préalable de modélisation; ce que constitue un logiciel appelé MODELS, dont il ne donne pas de détail. Nous préférons introduire la modélisation à l'aide d'une représentation plus primitive. Notre logiciel-jeu s'apparente au diagramme de flux avec en moins les artifices de la symbolisation utiles peut-être pour définir les relations d'un système mais pas pour accéder à son évolution.

g) Évolution et graphique multi-courbes

Les relations entre variables étant établies par le diagramme causal de la figure 3' en particulier (l'arsenal du diagramme de flux n'est pas nécessaire), il est maintenant possible d'envisager l'exploration de graphiques d'évolution tels le graphique multi-courbes.

En figure 6, sont données les courbes d'évolution des lièvres et des lynx selon les équations de Lotka-Volterra, aux paramètres près. Elles pourraient être les versions «polie» du graphique obtenu des données recueillies par la Baie d'Hudson.

FIGURE 6

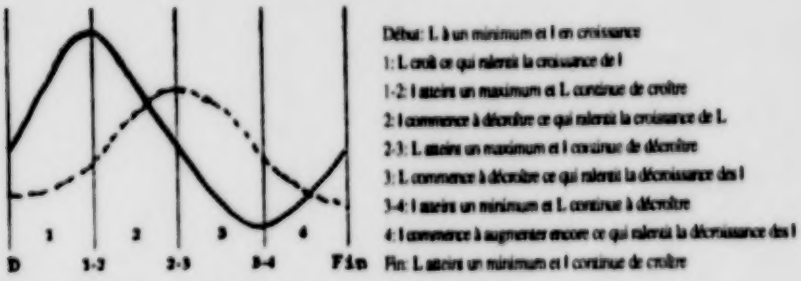


GRAPHIQUE MULTI-COURBES

Ce graphique multi-courbes donne simultanément l'évolution de chacune des populations. L'exploration de graphique à l'aide des relations que nous fournit le diagramme causal révèle un certain nombre de caractéristiques de cette évolution. Chaque courbe a une forme quasi-sinusoïdale avec des montées et des descentes qui déterminent une amplitude d'oscillation qui lui est spécifique. Elles montrent un pattern qui se répète ce qui veut dire que l'évolution de chaque population est cyclique. Les deux courbes ont la même période. Elles sont cependant déphasées l'une par rapport à l'autre. Les lynx sont

«en retard» sur les lièvres. Dans le graphique, on reconnaît quatre régions (cf. figure 7) dont la répétition décrit toute l'évolution de chacune des populations. En présentant le tracé des courbes de façon dynamique, on peut avec les élèves faire une analyse comparative de l'évolution des deux populations simplement en commentant les changements à l'écran. En focalisant l'attention des élèves sur ces quatre régions, on peut mettre en évidence le type de relations qui définissent un écosystème simple. L'analyse comparative des deux courbes est d'autant fait plus facilement que le mouvement est présent. **Cependant, l'interprétation de ces graphiques requièrent plus qu'une observation attentive des courbes lorsqu'elles sont tracées. Il faut coordonner des états et des changements:** tâche difficile comme le laisse soupçonner le texte qui accompagne la figure 7.

FIGURE 7



Légende: — lièvres (I) — lynx (L)

Le graphique multi-courbes permet une certaine exploration des caractéristiques du système que certains pédagogues ont tentée d'exploiter. Le didacticiel «Prey/Predator» de DENHAM-PREECE en est un exemple. Dans ce didacticiel, le facteur d'exploration est la population initiale, seul facteur que l'utilisateur peut changer. Chaque fois, sont tracées sur l'écran les courbes correspondant à l'évolution des populations, selon les populations initiales entrées numériquement. Les courbes tracées[4] sont semblables à celles présentées sur la figure 6.

En fournissant l'occasion aux étudiants de changer les populations initiales, on permet certainement de faire un pas important vers la découverte des caractéristiques du système. C'est ce que fait Preece. Cependant son didacticiel rend difficile la comparaison de différents ensembles de courbes que déterminent des populations initiales différentes. En effet, un seul de ces ensembles de courbes peut apparaître à la fois à l'écran. La comparaison suppose donc qu'on mémorise les caractéristiques et la forme du ou des ensembles précédents. L'exploration que peuvent faire les étudiants reste donc limitée. Mais comment faire autrement? Si on garde à l'écran les différents ensembles de courbes,

4 Preece utilise un modèle différent. Elle obtient donc des courbes différentes de celles de la figure 6 mais qui ont avec ces courbes plusieurs caractéristiques en commun.

celui-ci devient vite surchargé et la comparaison n'en est pas facilitée, au contraire. Ceci nous place devant un dilemme qui ne peut être résolu qu'en considérant la question sous un angle différent.

h) Évolution et diagramme de phase

Sur le graphique cartésien, chaque population est représentée par un point qui se déplace en fonction du temps sur deux courbes différentes. En fait, il est possible d'utiliser un seul point qui se déplace alors sur une seule courbe pour décrire l'évolution du système. C'est ce qu'on a avec ce qu'on appelle le diagramme de phase. La figure 8a donne le diagramme de phase correspondant au graphique multi-courbes de la figure 6. Un point représente les deux populations en un même temps (T): une avec la coordonnée x (les lynx) et l'autre avec la coordonnée y (les lièvres). Chaque point dans le diagramme de phase représente un état particulier du système. Le temps n'est plus ici explicite comme dans le graphique multi-courbes. **On peut toutefois retrouver cette variable en animant le diagramme de phase.**

Un cycle d'évolution du système lynx-lièvres, selon le modèle de Lotka-Volterra, correspond à une courbe fermée dans le diagramme de phase. D'autre modèle, celui de Preece, par exemple, donne des spirales (figure 8c).

FIGURE 8a

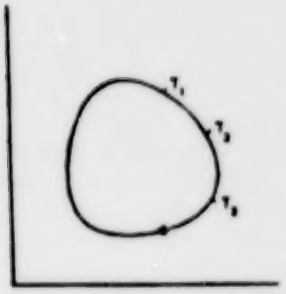


FIGURE 8b

FIGURE 8c

DIAGRAMMES DE PHASE

Spain et Soldan exploitent ce type de diagramme dans un didacticiel appelé PRÉDATION (1983). Les élèves y découvrent que chaque fois que sont changées les populations initiales, une nouvelle courbe fermée est tracée (figure 8b). Cependant, et à chaque fois, une nouvelle simulation doit être déclenchée et l'écran doit être recomposé. La comparaison que permet la figure 8b, en présentant les différentes courbes obtenues de populations initiales différentes, ne peut alors se faire. Sans la possibilité de produire cette figure (8b), les caractéristiques générales communes à toutes les courbes ne peuvent être aisément abordées.

Avec la figure 8b, le diagramme de phase est un outil puissant qui donne beaucoup de sens au travail sur les écosystèmes, dans ses deux versions, statique et dynamique. La figure montre l'existence de courbes fermées, déterminées par une paire de populations initiales. Elle montre que toutes les trajectoires du système «circulent» autour d'un état tel que le système sera stable, un point fixe pour l'évolution. Elle laisse penser (reste à le

prouver) que les maximum et les minimum sont alignés avec ce point de stabilité.[5] Elle montre aussi, mais dans sa version dynamique seulement, qu'un maximum de lynx est suivi d'un minimum de lièvres qui est suivi d'un minimum de lynx qui à son tour est suivi d'un maximum de lièvres suivi d'un maximum de lynx et ainsi de suite. **Mais surtout, elle permet de prédire les conséquences de perturbations en cours d'évolution. En effet, changer une population en cours d'évolution consiste à passer à une autre courbe.** Et l'effet qui s'ensuit dépend de l'état du système au moment de la perturbation.

i) Difficultés de compréhension des écosystèmes

Une première étape vers la compréhension des systèmes à rétroaction consiste à manipuler les concepts abstraits du modèle (concepts mathématiques dans les équations de Lotka-Volterra par exemple) tout en gardant à l'esprit le sens des relations fourni par le contexte. Et, faut-il souligner, même les objets concrets impliqués dans de tels systèmes prennent une nature abstraite: les lynx et les lièvres font partie de la population des lynx et de la population des lièvres, et les relations entre les deux populations sont de nature statistique. De plus, les mesures utilisées comme les taux de naissance et les fluctuations du taux d'inflation (dans un autre contexte) sont très complexes.

Par ailleurs, même si les équations définissent clairement les relations entre les variables, en pratique, pour un système particulier, ce sont les solutions (représentées explicitement dans un graphique cartésien) qui les expriment le plus clairement. **Comprendre un système à rétroaction se situe au-delà des équations.** À notre avis (c'était notre point de départ), **la compréhension d'un système à rétroaction passe par l'utilisation efficace des différentes représentations de l'évolution d'un modèle particulier pour arriver à caractériser l'évolution du système.** Une de ces représentations particulières est le multi-courbes. Mais comme nous l'avons explicité auparavant, il est difficile d'interpréter ce type de graphique sans clé; et cette clé est fournie par le diagramme causal. Une première compréhension des systèmes à rétroaction pourrait consister à pouvoir **coordonner les informations données par les diagrammes causal et multi-courbes de manière à caractériser l'évolution du système.**

Des difficultés subsistent toutefois. Jao Ponte (1985), Kerslake (1977), Janvier (1978) et René de Cotret (1985) ont montré que les élèves ont des problèmes à interpréter la variation d'une variable lorsqu'elle n'est pas linéaire. Ils ont aussi montré que c'est difficile pour les élèves de distinguer le taux de variation de la valeur d'une variable à un moment donné. Par exemple, on dira que la marée monte vite lorsqu'elle est haute. René de Cotret semble toutefois avoir réduit la difficulté reliée à ces graphiques à variation non linéaire par un enseignement basé sur des travaux expérimentaux significatifs. Mais, il reste que les boucles à rétroaction sont plus exigeantes dans le sens qu'elles impliquent deux variables avec leur taux de variation respectif. **Comprendre un système à rétroaction demande donc**

[5] Ceci peut être prouvé en utilisant la notion d'isocline.

de coordonner l'interaction de deux variables avec leur taux de variation, à l'intérieur d'une certaine classe d'interaction.

De plus, les boucles à rétroaction décrivent un processus fondamentalement dynamique qui nécessite **l'intégration d'une nouvelle sorte de relation entre variables**. Dans les cours de science, les premiers phénomènes qui sont expliqués aux élèves consistent en des relations où une variable (dépendante) est déterminée par une autre (indépendante). Par exemple, la température détermine la longueur d'une corde. **La méthode scientifique analytique consiste à étudier l'effet d'une variable sur une autre en gardant les autres variables fixes. Or, ce n'est pas possible pour les boucles à rétroaction.** Aucune variable ne peut être considérée comme dépendante et non plus comme indépendante (sauf peut-être le temps). Ceci constitue un obstacle majeur.

j) Voie vers la compréhension

Une première façon de concevoir la compréhension des systèmes à rétroaction était de pouvoir coordonner les diagrammes causal et multi-courbes. Toutefois, pour les raisons qui viennent d'être évoquées, nous en sommes venus rapidement à la conviction que cette compréhension pourrait être développée grâce à une simulation qui faciliterait la coordination des représentations à **condition qu'un certain contrôle du système puisse être réalisé par l'utilisateur, qu'il y ait donc des aspects interactifs, et que celui-ci puisse modifier les conditions ou les relations de système en tout temps et examiner les conséquences de telles modifications.** Comprendre un système à rétroaction, tel que nous l'avons défini au départ, consiste à pouvoir en donner les relations, en donner les caractéristiques d'évolution et aussi à pouvoir décrire les conséquences de perturbations.

Nous avons donc finalement associé à la compréhension d'un système à rétroaction, le diagramme de phase, en coordination avec le diagramme causal et le diagramme multi-courbes. Comme nous l'avons spécifié précédemment, le diagramme de phase apporte des informations supplémentaires révélatrices sur les systèmes à rétroaction et introduit cette dimension de prédiction que nous associons à la compréhension de systèmes à rétroaction.

Notre approche est basée sur l'idée que les représentations d'évolution de modèles peuvent être explorées avant même que des représentations de caractérisation soient construites et développées. Il existe des approches pédagogiques consistant en l'exploration de graphiques dynamiques d'évolution d'un modèle: par exemple, celle de Preece, avec le graphique multi-courbes, et celle de Spain et Soldan, avec le diagramme de phase. Avec ce type d'exploration, comme nous l'avons vu, beaucoup peut être découvert. Cependant, il reste que l'interprétation de graphiques d'évolution n'est pas une tâche facile. Les difficultés soulignées précédemment demeurent. Décrire correctement l'évolution de systèmes à rétroaction suppose être capable d'arriver à la délicate articulation changements-

états (montrée en figure 7) ou, en d'autres mots, être capable de combiner niveaux et taux de variation dans le but d'expliquer subséquemment les nouveaux niveaux et taux. La variable temps est omniprésente; ce que souligne Vitale (1988) si pertinemment. En conséquence, pour que les approches d'exploration avec graphique cartésien et diagramme de phase portent fruits, il nous apparaît nécessaire de prévoir préalablement des manipulations pertinentes des caractéristiques contextuelles impliquées. **Dans notre jeu, nous jouons non pas sur les valeurs numériques associées aux populations de proies et de prédateurs mais sur les populations elles-mêmes présentées analogiquement.** Il s'agit d'actions concrètes, dans le temps, comme si on avait affaire aux vraies populations. Ces manipulations doivent être maîtrisées en conjonction avec la variable temps, puisque les conséquences des actions dépendent de l'état des populations en cours d'évolution. Notre jeu a donc cette double possibilité: **faire manipuler les caractéristiques contextuelles du système et permettre de composer avec le temps.**

3. INSTRUMENT MÉTHODOLOGIQUE: DIDACTICIEL METTANT À PROFIT UNE REPRÉSENTATION DYNAMIQUE ET VISUELLE DE L'ÉVOLUTION D'UN ÉCOSYSTÈME

a) Introduction

Comme nous l'avons souligné, la coordination nécessaire des deux types de représentations, le causal et le multi-courbes, est une tâche difficile. C'est la même chose quant à la coordination du causal et du diagramme de phase. Notre entreprise avait pour but d'aider les élèves dans cette tâche. Mais, il nous est apparu que celle-ci ne pouvait être efficace que sous certaines conditions. D'une part, l'élève devait être amené à exercer un certain contrôle sur ces représentations, à intervenir sur l'évolution du système tel que représenté et à prédire les conséquences de ses interventions. D'autre part, il devait manipuler les éléments du contexte en conjonction avec la variable temps.

Différents didacticiels d'exploration de graphiques d'évolution d'écosystèmes existent (nous en avons donner deux exemples), mais l'approche est insatisfaisante. Généralement, elle consiste à fixer les paramètres d'un modèle et à faire exécuter les courbes correspondantes. En aucune manière, l'utilisateur ne peut intervenir sur l'évolution d'une courbe une fois le processus de traçage déclenché.

Ceci constitue à notre sens une limitation pédagogique majeure pour les raisons précitées, mais aussi parce qu'en réalité, non seulement nous observons des systèmes en évolution mais nous sommes souvent amenés à intervenir avec des conséquences pas toujours prévues. Ceci dit, amener les élèves à observer les conséquences de leurs actions sur le système en évolution constitue l'objectif général du jeu que nous avons conçu.

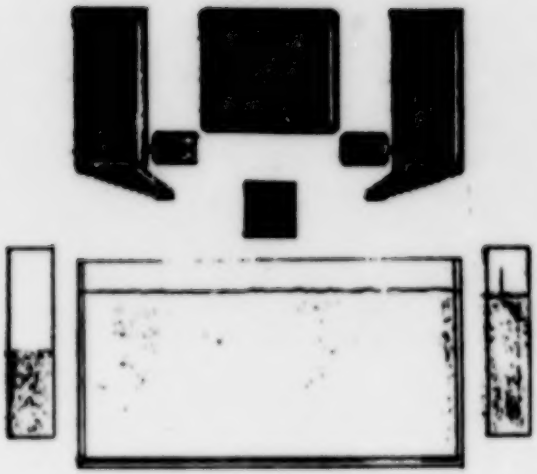
Cet objectif commande un contexte particulier dans lequel les actions peuvent être significatives. Après plusieurs tentatives, nous avons finalement opté pour deux populations de poissons: une population de poissons rouges, (les prédateurs), qui vit sur une population de poissons bleus (les proies). Les actions possibles sont: pêcher les poissons rouges, ce qui a une valeur commerciale, et ajouter au système des poissons rouges ou des poissons bleus. Le contexte central est celui-ci: un pourvoyeur est en charge d'une exploitation commerciale d'une réserve de poissons rouges sur son territoire; le pourvoyeur procure des services aux pêcheurs leur accordant ou non droit de pêche et ensemençant ses lacs en poissons rouges ou bleus si nécessaire.

L'interactivité s'est imposée comme source de questionnement. Le contexte se veut «réel», significatif, manipulable. Le choix de la représentation est lui aussi crucial puisqu'il est au centre de notre problématique. Le graphique multi-courbes nous apparaissait trop complexe. Le diagramme de phase quant à lui, n'a pas été découvert tout de suite mais a donné lieu plus tard à une deuxième version du jeu. De toute façon, nous voulions une représentation plus directement accessible, c'est-à-dire plus concrète (moins symbolique) ou plus directement liée aux objets manipulés et plus simple. Nous avons donc créé une représentation de l'écosystème que nous qualifions d'analogique et de primaire.

b) Présentation du jeu

Le but du jeu est de réaliser le maximum de profit (d'autres buts seront ajoutés dans une version subséquente). Pêcher des poissons rouges rapporte. Ensemencer coûte de l'argent et ensemencer des rouges coûte plus cher qu'ensemencer des bleus. Au centre de l'écran se trouve un rectangle de couleur variable selon le nombre de poissons rouges et de poissons bleus dans la réserve (figure 9). La couleur est plus ou moins rouge ou bleue illustrant la variation du rapport des deux populations: par exemple, s'il y a beaucoup de poissons rouges et peu de poissons bleus, la couleur sera plutôt rouge. La couleur est aussi plus ou moins pâle ou foncée pour illustrer la densité de poissons dans la réserve: par exemple, s'il y a peu de poissons au total, la couleur sera presque blanche. En fait, une couleur spécifique, avec un degré de violet et un degré de pâleur, décrit un état particulier du système.

FIGURE 9



LE JEU

De chaque côté du grand rectangle, sont placés deux longs rectangles dans lesquels varient en hauteur une colonne rouge (à gauche) et une colonne bleue (à droite). Ces colonnes représentent l'état de chacune des deux populations séparément en chaque instant (comme sur le multi-courbes).

Les actions du pourvoyeur ou des pêcheurs sont exécutées par l'utilisateur à l'aide de trois icônes.

L'icône de pêche marquée d'un hameçon est placée au-dessus du rectangle violet. En cliquant sur cette icône, des poissons rouges sont retirés de la réserve. Un délai toutefois est accordé, durant la période duquel une décision d'augmenter les captures peut encore être faite; le processus est cumulatif. À chaque «clic», la valeur commerciale des captures est enregistrée dans une case sous le rectangle central. Une fois la pêche terminée, le nombre de «clic» effectués est traduit par un changement soudain de la couleur du rectangle central (le rapport du nombre de poissons des deux populations étant modifié) et par une baisse brusque de la hauteur de la colonne représentant la population de poissons rouges.

Au-dessus du grand rectangle se trouve une horloge fixant le temps d'une partie et de chaque côté deux colonnes dans lesquelles sont stockés en pile des poissons rouges (à gauche) et des poissons bleus (à droite). Ces stocks servent à l'ensemencement des lacs.

Cet ensemencement est exécuté en cliquant sur une icône placée à côté de chacune des colonnes. Si on clique une fois, un segment horizontal apparaît en bas de la pile, déterminant un paquet de poissons à ensemencer. Pour chaque «clic» additionnel, le segment se déplace vers le haut déterminant ainsi un paquet deux fois, trois fois, ... plus gros. Encore ici un délai est accordé afin de cumuler les actions: ensemencer un, deux, trois, ... paquets. Une fois que le nombre de paquets à ensemencer est fixé, que le délai est écoulé, les paquets se déplacent vers le rectangle central et la couleur en est alors soudainement modifiée. De même, la hauteur des colonnes rouge et bleue, donnant respectivement la population rouge et la population bleue, augmente selon le nombre de paquets rouges et bleus ajouté.

La performance financière du joueur apparaît dans la case de droite sous le rectangle central. En début de jeu, le joueur bénéficie d'une encaisse de 5000$. Au fur et à mesure des pêches et des ensemencements, l'encaisse change.

Lors des actions le temps est figé. Une fois les actions complétées avec les répercutions immédiates qu'elles impliquent sur la couleur du bassin et sur la hauteur des colonnes rouge et bleue, le système se remet à évoluer en décrivant un cycle de couleur correspondant à la courbe du diagramme de phase sur lequel évolue dorénavant le système (jusqu'à ce qu'une nouvelle perturbation amène le passage à une autre courbe). Les colonnes varient conséquemment.

Dans le jeu est comprimé en quelques minutes une évolution qui prend normalement plusieurs années. Ceci n'est pas sans susciter des problèmes: toute action incontrôlée est rapidement réparable, il n'y a qu'à attendre quelques secondes.

Après réflexion sur le sujet, nous en sommes venus à intégrer au jeu de nouvelles contraintes liées au temps. D'abord les délais accordés lors des pêches et ensemencements donnent du temps de réflexion et permettent de prendre des décisions. Ensuite pêcher prend du temps: lors des pêches, quelques secondes sont prises et l'horloge avance d'autant une fois la pêche terminée.

Une autre règle qui s'est avérée très pertinente est celle des **catastrophes écologiques**. Dans la «vraie vie», il existe une limite à la densité de population que peut supporter un territoire; nous avons donc déterminé des limites au-delà desquelles le système est considéré en catastrophe. En référence au diagramme de phase, la zone de catastrophe se trouve à l'extérieur d'un quart d'ellipse centrée à l'origine. Les paramètres exacts définissant cette région sont inconnus des élèves et ils ont donc à les découvrir (qualitativement ou analogiquement) par leur propre expérimentation.

Chaque fois qu'un élève se place en catastrophe écologique, une amende est chargée (un pourcentage de l'encaisse alors accumulée): un rectangle apparaît dans le centre de l'écran indiquant «catastrophe écologique» avec le montant de l'amende.

Par ailleurs, on ne peut pas vider la réserve de poissons rouges en une seule suite de décisions. Pour ce faire, nous avons introduit une pêche proportionnelle: lors d'une pêche (un clic), le nombre de poissons capturés est proportionnel au nombre total de poissons disponibles dans la réserve. Nous avons toutefois maintenu la possibilité de perdre une population en introduisant pour chaque population un seuil minimal en deçà duquel la population est considérée exterminée.

À l'exception des valeurs d'argent (le profit réalisé lors des pêches, l'encaisse, les amendes), aucune autre valeur numérique n'est en jeu. La taille des populations n'est jamais donnée numériquement. Le jeu se veut purement analogique et c'est ainsi que les colonnes bleue et rouge, de chaque côté du grand rectangle, ne sont pas graduées. L'idée s'est imposée graduellement pour s'éloigner le plus possible des évolutions décrites numériquement et pour contrer l'attraction toujours puissante des nombres. Par ailleurs, la possibilité de rendre le jeu complètement analogique, en représentant, par exemple, les valeurs d'argent par un segment variable en longueur, a été écartée pour que n'entrent pas en conflit deux représentations trop semblables de deux objets différents et, sur un autre plan, pour le simple plaisir du jeu, car ces valeurs d'argent ce sont les points.

La plupart des paramètres contrôlant le jeu peuvent être ajustés indépendamment. Cependant la marge de manoeuvre n'est pas grande étant donné certaines contraintes: qu'il est souhaitable que la pêche et l'ensemencement prennent à chaque fois entre 3 et 6 «clic», que les colonnes soient aussi pleines que possible, etc.

4. PREMIÈRE EXPÉRIMENTATION

a) Objectifs

L'objectif d'un tel jeu est de donner à l'élève l'occasion d'expérimenter et d'explorer un système à rétroaction, pour ainsi lui permettre de retirer de l'information sur les systèmes à rétroaction, tout au moins sur celui qu'il explore. Nous voulions que le jeu constitue une expérience d'apprentissage, apprentissage de comment jouer ou apprentissage de la rétroaction, la compréhension du système poissons bleus/poissons rouges s'assimilant pour nous à la capacité à jouer. Si quelqu'un arrive à bien jouer, il devrait avoir identifié les caractéristiques du système et être capable de prédire les conséquences de ses actions. Corollairement, les difficultés qu'il rencontre en jouant devraient lui permettre de préciser les composantes de base de la compréhension d'un système à rétroaction. Pour la première expérimentation, les objectifs sont toutefois plus modestes. Il y en a trois.

Nous avons présenté le jeu à des étudiants d'université (Baccalauréat en enseignement des mathématiques). Le jeu apparaissait jouable, en cohérence avec ce que nous voulions proposer, intéressant même. Mais en serait-il de même avec des élèves du secondaire et à partir de quand le jeu était-il jouable? Et surtout, comment ces élèves allaient-ils jouer? Par cette question, nous voulions surtout savoir quelles étaient les **stratégies utilisées par les élèves**, bonnes ou mauvaises, et comment celles-ci se modifiaient au fur et à mesure des jeux.

Notre deuxième objectif visait le **contexte du jeu**: celui des poissons rouges et bleus. Nous voulions savoir dans quelle mesure les élèves s'appuyaient sur ce contexte pour jouer.

Le troisième objectif s'est imposé une fois que l'équipe a pris connaissance du diagramme de phase. Comme nous l'avons précisé précédemment, ce diagramme a la particularité de permettre une prédiction des effets d'une perturbation sur le système. Il traduit donc bien ce que le jeu propose et il est possible de jouer notre jeu en référence constante au diagramme de phase (figure 8b). L'équipe est devenue fort habile à ce jeu, si bien qu'il était dorénavant impossible de jouer autrement. Le troisième objectif voulait donc répondre à la question: est-ce qu'une familiarisation préalable avec le diagramme de phase entraînerait des stratégies différentes de celles découvertes préalablement, ou plus justement des stratégies différentes selon qu'on connaisse ou non le **diagramme de phase**?

b) Sujets

Pour répondre à l'objectif 1, nous avons présenté le jeu en secondaire I. Si le jeu était jouable, pouvait-il l'être sitôt? La question est d'autant plus pertinente qu'on introduit les élèves aux écosystèmes dès le secondaire I. Nous avons rencontré des enfants provenant de deux écoles de la C.E.C.M. Pour ce rapport toutefois, nous n'avons analysé les résultats que d'une seule en raison de certaines difficultés d'organisation de l'expérimentation dans une première école.

La population étudiée est constituée d'une quarantaine d'enfants de secondaire I, de la polyvalente Pierre-Dupuy. Le tiers environ appartient à une classe dite faible. Le reste provient d'une classe régulière.

Pour répondre à l'objectif 3, nous avons préféré aller en secondaire V, étant donné la complexité d'interprétation d'un graphique tel le diagramme de phase, d'autant plus que les élèves n'ont pas l'habitude de ce type de graphique. Nous avons rencontré deux groupes de seconde du programme français (équivalent secondaire V) du Collège Stanislas. Un groupe a servi de groupe expérimental, c'est celui à qui le diagramme de phase a été proposé, et l'autre groupe a servi de groupe contrôle (groupe à qui le diagramme de phase n'a pas été proposé). Chaque groupe contenait vingt-sept élèves.

Quant à l'objectif 2, les deux populations pouvaient être utiles.

c) Méthodologie

En secondaire I, nous disposions d'une salle de classe où six ordinateurs AMIGA étaient installés en permanence. Les élèves jouaient deux par deux, à l'occasion à trois. Le jeu leur a été présenté dans ce local, devant ordinateur. La présentation a été rapide et n'a consisté qu'à donner les règles du jeu avec les relations de base du système (les poissons rouges mangent les poissons bleus, les poissons bleus ont de la nourriture en abondance). La présentation est faite par le responsable du projet ou par un observateur sur place. Suite à la présentation, les élèves jouent autant de partie que le temps leur permet. Les groupes d'élèves sont sous la surveillance d'étudiants universitaires entraînés à cette fin. Deux caméras vidéo sont constamment en action. Les élèves ont disposé de deux séances de jeu, soit environ deux fois 50 minutes. Notons que le climat général de cette première expérimentation en secondaire I est décontracté avec échange entre équipe et à l'occasion déplacements. Suite à ces séances de jeu et à une première évaluation des résultats, nous avons rencontré, en entrevue individuelle, quelques élèves qui sont apparus intéressants.

En secondaire V, la méthodologie est très différente étant donné l'objectif poursuivi à ce niveau. D'abord, puisque les élèves ne sont pas familiers avec le diagramme de phase, nous avons conçu une séance de présentation de ce diagramme lors de laquelle nous présentions aux élèves une situation familière à nature économique. Cette séance (cf. module de présentation du diagramme de phase, appendice 2), avait pour but de donner du sens aux déplacements de points dans de tels graphiques. Elle est décrite dans la section d de ce chapitre.

Nous avons donc rencontré le groupe expérimental, pour la première fois, pour la présentation de cette séance. Celle-ci s'est déroulée sur une période de 50 minutes, habituellement consacrée à un cours d'économie. Au cours de biologie qui a suivi, le professeur habituel a présenté aux élèves de ce même groupe la situation proies-prédateurs avec les relations impliquées et les changements qui en découlent sur les populations formant le système. Il a présenté le graphique multi-courbes et le responsable du projet a ensuite présenté le diagramme de phase correspondant (cf. appendice 3). Le contexte présenté était celui des mouettes qui mangent des crustacés et petits poissons. Le professeur de biologie du groupe témoin a présenté le système mouettes-poissons comme son collègue. Le diagramme de phase n'a pas été présenté à ce groupe. Aucune séance de familiarisation à celui-ci n'était donc nécessaire.

À la fin de cette rencontre, les élèves ont été introduits au contexte du jeu, poissons rouges - poissons bleus, en précisant qu'il leur serait possible d'intervenir pour modifier l'évolution des populations en pêchant ou ensemençant des poissons. Dans le groupe

expérimental, les élèves ont pu se déplacer eux-mêmes à l'intérieur du diagramme de phase en enlevant ou ajoutant des poissons.

Finalement, le jeu a été présenté avec ses règles et durant deux séances de 30 minutes les élèves ont joué par équipe de deux (tout au moins en commençant).

Le tableau 1 donne en résumé la procédure utilisée.

TABLEAU 1

Première expérimentation - Secondaire V

	COURS D'ÉCONOMIE	COURS D'ÉCOLOGIE	JEU
GROUPE TÉMOIN	nil	relations proies-prédateurs; multi-courbes et contexte du jeu	présentation et deux périodes de jeu d'environ 30 min., par groupe de deux
GROUPE EXPÉRIMENTAL	présentation du diagramme de phase dans un contexte économique	relation proies-prédateurs; multi-courbes **diagramme de phase** et contexte de jeu	présentation et deux périodes de jeu d'environ 30 min., par groupe de deux

Comme en secondaire I, les groupes d'élèves sont sur la surveillance d'observateurs entraînés et deux caméras sont en action.

En secondaire I et en secondaire V, des périodes de jeux sont déterminées dans l'horaire scolaire de façon à donner la chance à chacun de jouer deux fois. Toutefois, tout se fait sur base volontaire et il arrive que certains fassent faux bond, mais ils sont peu nombreux.

d) Présentation du diagramme de phase

L'introduction du diagramme de phase dans l'expérimentation avait pour but de fournir un outil d'exploration aux élèves. Nous avons choisi une situation différente de celle du jeu ou de l'écologie pour renforcer son rôle d'outil général d'étude.

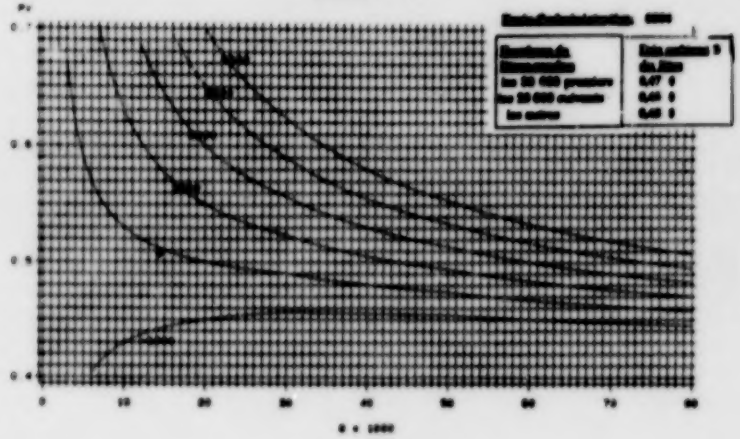
Un premier document a été réalisé par Claudine Mary et Sophie René de Cotret en mars 1988. En mars 1989, l'équipe en compagnie des étudiants de premier cycle (observateurs) a évalué durant quelques séances de travail ce premier document rédigé à partir du thème: «Nos saucisses sont plus fraîches parce que plus de gens en mangent et plus de gens en mangent parce qu'elles sont plus fraîches». La situation créée impliquait trois variables: le nombre de saucisses vendues, la qualité de la saucisse et le prix de vente. Suite à l'évaluation, l'idée thème a été abandonnée. Le contexte traînait des conceptions personnelles trop nombreuses. Les étudiants trop impliqués dans la situation n'acceptaient pas les caractéristiques que nous lui avions données ou prédisaient des comportements de consommateurs que nous n'avions pas prévus. Il apparaissait difficile de dissocier le comportement individuel du comportement moyen des consommateurs. De plus, trop d'éléments perturbateurs jouaient et souvent en conflit avec notre modèle: saisons, publicité qui existe ou non selon les quartiers, habitudes de consommation, etc.

Le cadre général qui menait à donner un sens au déplacement des points dans le plan du diagramme de phase a été toutefois maintenu et utilisé avec une situation différente.

La situation retenue pour l'expérimentation implique trois stations services engageant une guerre des prix. Le diagramme de phase représente les variations du prix au litre d'essence et des quantités vendues selon différentes courbes d'évolution du profit. Chaque station est inscrite au départ par un point sur ce diagramme de phase, montrant son prix au litre et la quantité d'essence vendue en une semaine, en ce début de guerre des prix. D'une semaine à l'autre, dans ce processus de guerre des prix, les prix changent et les quantités d'essence vendue également, selon chacune des stations. Celles-ci se déplacent donc sur le diagramme de phase, d'une courbe de profit à l'autre, à cause des changements survenus dans la compétition qui s'est installée. La performance de chaque station est décrite par une ligne brisée, qui joint chacun des points ainsi enregistrés. Les prix et quantités d'essence changent en raison de facteurs appartenant au contexte.

FIGURE 10

COURBES DE PROFIT



La séance de présentation du diagramme de phase a été testée auprès des étudiants universitaires qui sont devenus par la suite les observateurs. Le lecteur trouvera en appendice 2, la séance telle que présentée.

e) Modalité de participation des sujets et contexte de jeu: premières constatations

Pour son rapport de stage Madeleine Vachon, étudiante de 2e cycle, s'est penchée sur la dynamique des équipes de jeu dans ce contexte justement de jeu. Rappelons que tous les élèves, secondaire I et V, étaient contraints de jouer en équipe de deux. Après observation et retour sur les bandes vidéo, elle distingue deux phases dans les relations entre coéquipiers ou entre équipes. Au départ et dans la plupart des équipes, semble s'installer le scénario suivant: un des sujets manipule la souris tandis que l'autre observe, rend compte verbalement du comportement du système, critique le jeu de son coéquipier, ou établit la marche à suivre. Souvent le joueur-observateur repère les états du système et indique à son camarade, à sa demande, quand intervenir: *«tu me le diras quand il arrête de baisser lui»*.

Une fois dépassée la première phase d'appréhension des éléments du jeu, les sujets se désintéressent du jeu de leur coéquipier et dans la plupart des cas choisissent d'aller voir ce que les autres équipes font. En outre, quand s'installe une stratégie personnelle de jeu,

les sujets démontrent une préférence pour le jeu solitaire. Madeleine situe cette étape autour du 3e jeu en secondaire V et du 10e jeu en secondaire I.

Par ailleurs, elle note qu'en secondaire I, le contexte jeu semble favoriser les relations sociales. Les sujets s'informent spontanément du rendement des autres équipes. Il faut dire que dans un but d'émulation, nous avons ajouter au jeu une dimension de compétition interéquipe (que certains ne manqueront pas de nous reprocher) en donnant aux élèves un record à battre.

f) Résultats de la première expérimentation et conclusions

Les résultats obtenus ne sont pas concluants par rapport à nos objectifs, mais ils n'en sont pas moins intéressants. Notre premier objectif était de vérifier si le jeu était jouable: il l'est et dès secondaire I et il est intéressant. **Cependant, il est jouable dans une certaine limite que nous révèle l'étude des stratégies de jeu.** Nous donnerons ici un portrait global de l'évolution des stratégies tel qu'il nous est apparu. Les résultats ressortent de l'observation des élèves en train de jouer et des protocoles d'élèves dressés par Madeleine Vachon.

Puisque le jeu consiste à faire de l'argent en vendant ou en pêchant des poissons rouges, il fallait s'attendre, en début de jeu, à ce que les élèves focalisent leur attention sur la population de poissons rouges. C'est ce que la plupart des élèves adopte comme première stratégie de jeu[6]: pêcher, ajouter des rouges, pêcher, ajouter des rouges et ainsi de suite. Mais cette stratégie de départ ne peut tenir longtemps:

1) parce que les rouges coûtent chers et que l'achat de rouges pour ensemencement conduit rapidement à une «encaisse» trop basse pour maintenir la stratégie,
2) parce qu'une pêche excessive (elle est en fait inconsidérée) mène à la catastrophe (par accroissement excessif des bleus).

Souvent alors, devant l'impasse, plusieurs équipes vont essayer d'ajouter des poissons bleus. Dans les deux groupes, on prendra souvent toute la première période de jeu à tenter, de façon hasardeuse, à se sortir de la stratégie primitive que nous appelons **«exploitation inconsidérée des rouges»**. Au départ, il semble que peu de sens soit donner au mouvement des colonnes ou au changement de couleur du rectangle central. L'attention est attirée par l'«encaisse» qui donne le score et il faudra quelque chose de spécial pour qu'elle s'en écarte (un comportement bizarre ou ultime de ce score). Un tournant majeur dans l'évolution des stratégies s'effectue lorsque par nécessité (on ne sait plus quoi faire) ou décision ferme, à un moment ou l'autre, **on laisse le système**

6 Nous parlons de la stratégie de jeu comme d'un pattern de jeu mais d'un pattern qui s'est avéré être délibéré d'après les commentaires recueillis en cours de jeu.

évolué sans intervention et on observe les patterns dans le mouvement des colonnes ou le changement de couleur du bassin. Sans cette décision (ou pseudo-décision), aucun progrès n'est fait vers une stratégie systématique, c'est-à-dire vers un jeu précis qui reflète un choix d'actions et de moments d'intervention bien précis qu'on répète pour en tester l'efficacité en termes de résultat.

Le premier indice de systématisation est une **pêche au maximum des rouges** (lorsque la population de poissons rouges est à son maximum), accompagnée d'un **abandon de l'ajout de poissons rouges** (on constate que ce n'est pas nécessaire). En phase transitoire vers un jeu optimal, nous observons le plus souvent une tendance à des **jeux prudents**, près de la stabilité, conséquences de catastrophes répétées: on tente de garder le système loin des zones de catastrophes, on évite donc les grandes amplitudes dans le mouvement des colonnes.

Dans ce que nous appelons les stratégies systématiques, nous avons observé des stratégies d'exploitation du système par **pêche seulement**: on pêche lorsque la population des rouges est à son maximum, ensuite on attend que la colonne des rouges remonte toute seule ou que le bassin redevienne plutôt rouge (équivalent diagramme: figure 11a). En fait, les élèves ont constaté qu'il n'est pas nécessaire d'ajouter des rouges, *«ils remontent tout seul»*. Cette stratégie améliore les scores mais elle n'est pas optimale. Certains en resteront là. D'autres changeront de stratégie. Plusieurs auront constaté il y a longtemps qu'**ajouter des bleus peut aider** la population de poissons rouges à croître.[7] Ce constat, fait tôt ou tard par la plupart des équipes, marque un autre point tournant dans l'évolution des stratégies. Il s'accompagne d'une excitation qui manifeste bien de la non-usualité de la chose. Cette stratégie qui par prudence peut se jouer près du point de stabilité comme nous l'avons d'abord préciser évoluera vers la zone de catastrophe; on arrive ainsi à un jeu efficace, près de l'optimal: la population de poissons bleus est amenée à un maximum, près voire aussi près que possible de la catastrophe, pour aider la population de rouge à croître le plus (équivalent diagramme: figure 11b).

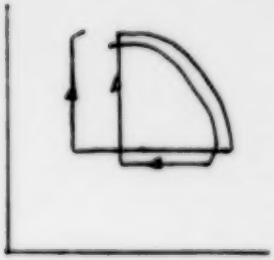
---

7 En fait, l'ajout de bleus n'aide pas toujours les rouges (ça il ne le constate pas) mais sitôt la systématisation entreprise avec pêche au maximum des rouges, on ne peut que constater que l'ajout de bleus provoque un accroissement des rouges.

FIGURE 11a

PÊCHE SEULEMENT

FIGURE 11b



PÊCHE AVEC AJOUT DE B

Nous constatons qu'on joue **à la limite de la catastrophe**, lorsque manifestement on tente de découvrir le plus grand nombre de poissons bleus qu'on peut donner aux rouges pour aller aussi haut que possible dans la colonne sans provoquer de catastrophe.[8]

On arrive donc majoritairement à la stratégie: **ajouter des bleus pour faire monter les rouges, attendre (que les rouges montent), pêcher les rouges (lorsqu'ils sont à leur**

8 D'autres stratégies peuvent être identifiées comme nous l'avons fait ultérieurement en secondaire III. Ici, nous n'avons voulu que donner un portrait général de l'évolution des stratégies avec ses deux points tournants et la stratégie finale adoptée par une grande majorité des élèves. En appendice 5a, le lecteur trouvera décrites les stratégies des élèves de secondaire III avec en illustration des extraits de protocole.

maximum) et immédiatement rajouter des bleus, attendre,... Cette stratégie restreint les élèves à une région du diagramme de phase (figure 11b). On n'est pas en mesure de constater les effets différents selon les états et les élèves n'exploitent pas plus que les relations de base du système proies-prédateurs: plus il y a de bleus, plus il y a de rouges; moins (plus) il y a de rouges plus (moins) il y a de bleus.

En fait, les relations se formulent comme les effets **(immédiats)** sur une population des actions qui sont effectuées sur l'autre population: donnons à manger aux rouges pour qu'il augmentent, si on pêche beaucoup les bleus croissent beaucoup, ajoutons des rouges pour contrer la catastrophe (pour manger les bleus). La rétroaction, c'est-à-dire l'action d'une population sur elle-même, est absente. Seule une stratégie par pêche excessive - diminuer les rouges pour les faire augmenter - exploite la rétroaction. Mais cette stratégie n'est pas favorisée par le jeu en raison des risques de catastrophe.

Ce premier résultat nous a conduit à remettre en question notre affirmation comme quoi la performance au jeu était directement liée à la compréhension du système à rétroaction: être bon au jeu ne menait en fait pas plus loin qu'aux relations de base sans rétroaction. Il fallait pousser les élèves en dehors de cette région de jeu où ils se confinaient et améliorer le jeu et ses règles.

La réponse à la troisième question fut tout aussi brutale. En secondaire V, nous n'avons observé aucune différence entre les groupes témoin et expérimental. L'introduction systématique au diagramme à laquelle nous avons soumis le groupe expérimental n'a pas porté fruits. Aucun transfert au contexte du jeu ne semble s'être produit et aucune différence n'a été notée dans les stratégies du groupe expérimental comparativement au groupe témoin. La sollicitation n'était pas assez forte: il fallait inciter à l'utilisation du diagramme de phase en cours de jeu.

Reste la deuxième question relative au contexte. Nous la réservons pour plus tard, lorsque nous traiterons des résultats généraux des deux expérimentations.

5. DEUXIÈME EXPÉRIMENTATION

a) Entrevues en secondaire I

Dans le but d'améliorer le jeu pour permettre une plus grande exploration de l'ensemble du cycle du système à rétroaction, Claude Janvier et Claudine Mary ont rencontré en entrevue cinq élèves de secondaire I. Ces élèves ont été choisis parce qu'ils présentaient un comportement intéressant lors des séances de jeu: tendance à verbaliser, stratégie de zone gagnante bien assurée, références contextuelles fréquentes... D'autres se sont portés volontaires. Ces élèves étaient vus individuellement, sur la période de dîner de

l'école. Nous leur demandions de jouer et d'expliquer leur stratégie (comment ils faisaient, pourquoi ils faisaient ça, pourquoi ça et pas autre chose,...). Nous leur avons aussi proposé deux objectifs à atteindre différents, par rapport au jeu qu'ils avaient l'habitude de jouer. L'un des jeux consistait, dans un premier temps, à prédire jusqu'où monterait ou descendrait une colonne et, dans un deuxième temps, à tenter de faire monter ou descendre une colonne sous certaines contraintes d'action fixées par l'interviewer. L'autre jeu consistait à mettre le système en état de stabilité encore sous certaines contraintes fixées par l'interviewer. Ces entrevues n'avaient pas de statut formel et se sont passées en toute liberté.

De ces entrevues, deux «résultats» ressortent que nous formulons comme nouvelles hypothèses d'expérimentation:

1) plus on est performant au jeu, plus il est difficile de s'écarter de la zone optimale du jeu,
2) le jeu (dans sa première version) développe chez les élèves une base qui leur permet de découvrir plusieurs caractéristiques importantes des systèmes à rétroaction, et sur laquelle pourra s'appuyer éventuellement une étude plus approfondie.

En effet, nous avons constaté chez Marc, joueur très performant et sûr d'être le meilleur, une résistance forte à jouer les autres jeux que nous avons proposés. Marc, un joueur habitué des jeux vidéo, songeait à des améliorations techniques qui pourraient augmenter sa rapidité de jeu et donc son score. Les autres jeux ne donnaient pas de points et n'exploitaient pas ses réflexes développés avec fierté lors des séances de vrais jeux. Par ailleurs, nous avons pu constaté chez Aristide comment pouvait déjà s'articuler en secondaire I les relations entre variables dans une longue chaîne d'inférences. Nous donnons ci-dessous un extrait de l'entrevue réaliser avec Aristide, pour que le lecteur évalue la mesure de nos propos et à titre illustratif des entrevues réalisées.

Extrait de protocole

Il y a deux interviewers identifiés par I1 et I2. Aristide est identifié par A.

I1: *Es-tu capable de la faire descendre plus bas?* (la colonne des rouges)
A: *Plus bas? Quand y aura presque plus de bleus, elle va descendre, j'pense.*
I1: *Elle descend pas plus bas.*

Aristide ajoute deux rouges lorsque les bleus sont au minimum.

I2: *Pourquoi tu as fait ça?*

A: *Y aura pu de bleus.*
I2: *Ah, pour manger les bleus! Et tu penses que s'il y a pu de bleus ça va faire descendre les rouges.*
A: *Y auront pu à manger.*
I2: *Essaie de le faire descendre encore plus bas sans pêcher.*

Aristide ajoute deux rouges mais lorsque les bleus sont abondants et que les rouges sont peu nombreux.

I1: *C'est supposé faire quoi les rouges là?*
A: *Manger les bleus.*
I1: *Oui il est descendu. Tu l'as eu. Tu as un raisonnement fort. Tu as dit: pour qu'on fasse descendre les rouges plus bas, il faut faire disparaître les bleus.*
A: *Oui, il faut mettre plus de rouges, là les bleus vont diminuer, les rouges auront presque pu de manger et ils vont descendre plus.*
I2: *Serais-tu capable de faire la même chose en mettant des bleus?*

Aristide dit ne pas savoir, suggère la pêche, puis ajoute trois paquets de bleus lorsque les rouges sont au minimum.

I1: *Oui, il est plus bas.*
I2: *Explique ça.*
A: *J'ai mis beaucoup de bleus en pensant que les rouges vont monter, là i vont manger les bleus, les bleus i en restera presque pas pi les rouges vont descendre parce qu'il restera presque plus de manger.* [On note ici la rétroaction double des rouges sur eux-mêmes et des bleus sur eux-mêmes: 1) on demande de faire diminuer le minimum des rouges et pour ce faire, il augmente le maximum des rouges (par les bleus); 2) son intention paraît être de faire baisser les bleus et il en ajoute.]
I1: *Donc t'as tout expliquer ça en bleu et en rouge. Si je te dis la chose suivante qu'est-ce que t'en penses? Les rouges i ont monté, tu les as fait monter et plus qu'i ont monté plus i ont descendu. Est-ce que ça de l'allure?*
A: *Peut-être.*
I2: *Ou bien: t'as fait monter les rouges par les bleus. Plus tes rouges ont monté plus tes bleus ont descendu. Plus tes bleus ont descendu plus tes rouges ont descendu.*
A: *Oui, je pense plus ça.*
I1: *C'est comme ça que tu penses ça. Tu penses ça mieux que moi. T'as fait descendre tes bleus, i avait pu de bleus, i ont été obligé de descendre. C'est par les bleus que t'expliques les rouges.*
A: (...)
I1: (...)
I1: *I vont tu disparaître les bleus?* L'interviewer ajoute des rouges au minimum des bleus.

A: *Ça va faire une catastrophe je pense.*
I sont disparus.
I2: *I sont disparus. Qu'est-ce qui se passe?*
A: *Ben les rouges descendent.*
I2: *Pourquoi?*
A: *I ont pu de manger.*
I1: *Tu connais ça!*
FIN DE L'ENTREVUE

Dans cet extrait d'entrevue, nous proposons à Aristide ce que nous appellerons dorénavant le jeu du maximum ou du minimum. Ce jeu avec celui de la stabilité sont apparus appropriés pour encourager une réflexion sur les mouvements des colonnes et pour permettre une plus grande exploration du système. Dans ce qui suit, nous décrivons la version informatisée du jeu de la stabilité proposé aux élèves en entrevue, avec les raffinements que nous a permis l'informatique. Notre intention était également de produire une version informatisée du jeu du maximum ou du minimum. Toutefois, question de temps, nous avons dû nous limiter à un seul jeu et nous avons choisi celui de la stabilité (pour des raisons de pertinence écologique).

b) Le jeu de la stabilité

Le jeu de la stabilité se trouve un appendice du jeu ordinaire (le jeu de première expérimentation). Il se joue exclusivement sur colonnes (le rectangle violet est caché). Le but du jeu est de placer et de maintenir une population, ici celle des rouges,[9] près de la stabilité. En pratique, il s'agit de maintenir la population des rouges à l'intérieur d'une région délimitée par deux traits horizontaux sur la colonne représentant cette population. Ces traits déterminent un intervalle autour de l'état de stabilité. Le cycle d'évolution sur lequel se trouve le système est déterminé au hasard.

Les points sont fonction du temps pris pour amener le système dans cette position. Une fois que le joueur juge qu'il a réussi, il déclenche un processus de vérification en cliquant sur une icône prévue à cet effet. L'ordinateur vérifie alors si durant un cycle complet la population reste à l'intérieur des limites fixées. Plus l'état de stabilité est atteint rapidement, plus le score du joueur est élevé. Tout au long du jeu, avant la période de vérification, un score apparaît dans la fenêtre qui cache le rectangle violet, décroissant au fur et à mesure que le temps s'écoule. Le jeu de la stabilité a été utilisé soit en bonus au jeu ordinaire, dans quel cas le bonus était un pourcentage plus ou moins grand du score établi en jeu ordinaire, soit indépendamment du jeu ordinaire, dans quel cas le score représentait un pourcentage de l'encaisse de départ, soit 5000$.

---

9 Une autre version du jeu prévue concernait la population de poissons bleus.

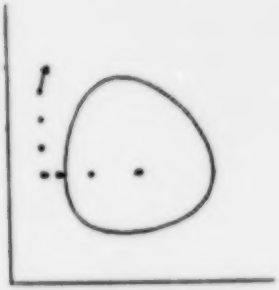
c) La version diagramme de phase de jeu

Une autre amélioration du jeu avait pour objectif de pousser les élèves à se référer au diagramme de phase et ainsi entraîner le transfert de stratégies du diagramme au jeu. Nous avons donc conçu une version du jeu où les colonnes absentes sont remplacées par un diagramme de phase. Les paramètres sont les mêmes que pour le jeu ordinaire (avec colonnes) ainsi que les actions permises.

Le diagramme de phase est placé à gauche de l'écran, superposé à l'image du jeu ordinaire. Le mouvement des colonnes est arrêté alors que le rectangle central continue de changer de couleur. Apparaît sur le diagramme, les axes en rouge et bleu et un point qui bouge décrivant une courbe fermée représentant l'évolution du système. Cette première courbe reste en permanence à l'écran, en référence, le temps d'un jeu. Lorsque par une action on change l'évolution du système et qu'on se retrouve sur une autre courbe fermée de la même famille, n'apparaît alors que le point qui bouge avec derrière lui une trace plus ou moins longue de son passage. Toute la trace, c'est-à-dire une courbe complète, aurait embrouillée l'image surtout au fur et à mesure des interventions. La trace laissée ressemble à un serpent qui se déplace suivant un pattern particulier, en fait sur les courbes invisibles du diagramme de phase. Le serpent change de longueur selon qu'il est plus ou moins loin de l'origine. Il change aussi de couleurs en fonction du rapport rouges-bleus, comme le rectangle violet.

Lors d'une opération de pêche, en cliquant comme pour le jeu ordinaire sur l'icône avec hameçon, un pointillé apparaît marquant le passage à une autre courbe (cachée) du diagramme de phase (figure 12). À chaque coup de pêche un point indique l'état de la population de rouges. Étant donné la pêche proportionnelle plus on pêche plus les points se rapprochent selon le nombre de captures enregistrées. Durant cette opération, le serpent disparaît pour ne réapparaître qu'une fois la pêche terminée. Lorsqu'on ajoute des poissons, un pointillé apparaît également indiquant le nouvel état de la population. On a ici un pointillé à sauts réguliers puisqu'à chaque coup, l'ajout est toujours le même.

FIGURE 12



JEU DIAGRAMME

Cette version du jeu est utilisée conjointement avec la première, celle avec colonnes.

d) Sujets, méthodologie, objectifs et déroulement

Le jeu stabilité et la version diagramme de phase du jeu ont été testés auprès de vingt-quatre élèves de secondaire III de la polyvalente Pierre-Dupuy. Les élèves ont été divisés en deux groupes selon les deux grandes conclusions de la première expérimentation: un groupe «exploration élargie» avec jeu de la stabilité et un groupe «diagramme à forte dose». L'orientation de cette deuxième expérimentation reflète deux convictions: la représentation colonne est assez significative pour permettre une exploration satisfaisante du système à rétroaction et le diagramme de phase est un outil particulièrement approprié duquel on peut tirer une connaissance enrichie de ce même système. Au premier groupe, nous avons proposé le jeu ordinaire, avec colonnes et rectangle violet, de la première expérimentation. Chaque jeu ordinaire était suivi de celui de la stabilité dont les points s'ajoutaient en bonus au jeu ordinaire. Nous appellerons ce groupe «ORD+» pour jeu ordinaire avec bonus. Le deuxième groupe a joué au jeu diagramme en alternance avec le jeu ordinaire, avec colonnes, et a été préalablement préparé à l'utilisation du diagramme de phase comme en secondaire V à l'aide de la situation des trois stations d'essence. À court de temps, le contexte écologique leur a ensuite rapidement été présenté avec diagramme de phase. Nous appellerons ce groupe DIAG. Le contexte écologique a également été présenté au groupe ORD+ mais sans le diagramme de phase.

Le groupe ORD+ a eu droit à deux séances de jeu et le groupe DIAG à trois selon le tableau ci-dessous:

	1re séance	2e séance	3e séance
ORD+	jeu ordinaire	jeu ordinaire + bonus (jeu de la stabilité)	
DIAG	d'abord, jeu ordinaire puis en alternance, jeu ordinaire et jeu diagramme	jeu ordinaire et jeu diagramme en alternance	jeu de la stabilité

Chaque séance de jeux dure environ 50 minutes sauf la troisième du groupe DIAG qui ne dure qu'une trentaine de minutes. Le groupe ORD+ joue le jeu de la stabilité en bonus après chaque jeu ordinaire, tandis que le groupe DIAG joue plusieurs jeux de stabilité les uns après les autres sans jeux ordinaires. Dans le groupe DIAG le jeu de la stabilité servait de test: si le diagramme permettait une meilleure exploration du système, ceci devait se refléter dans le jeu de la stabilité.

Le groupe DIAG se familiarise avec le jeu ordinaire en jouant quatre ou cinq jeux avant d'aborder le jeu diagramme. Une équipe cependant fera jusqu'à huit essais sur jeu ordinaire, parce que des actions cumulées amènent systématiquement le système en catastrophe et que l'équipe n'a pas l'occasion alors d'observer le mouvement des colonnes (cf. D3, appendice 5b).

Encore une fois, les élèves jouent en équipe de deux. Toutes les équipes sont observées comme précédemment et six équipes sont filmées: trois équipes ORD+ et trois équipes DIAG. Les observateurs n'interviennent en principe que pour répondre à des questions d'éclaircissement. Parfois l'observateur a dû toutefois aller plus loin. De plus, après deux séances de jeu, soit à la fin de l'expérimentation pour ORD+ et avant le jeu de la stabilité pour le groupe DIAG, les observateurs posent une série de questions à chaque équipe pour s'assurer des stratégies. Ils demandent entre autres, d'expliquer leur jeu et de donner, s'il y a lieu, leur préférence colonnes ou diagrammes (voir liste des questions en appendice 4). Des questions sur le jeu de la stabilité sont aussi prévues, en fin d'expérimentation pour les deux groupes.

Pour la deuxième expérimentation, les moyens que nous fournit le jeu amélioré déterminent de nouveaux objectifs. Les questions que nous nous sommes posées sont les suivantes:

1) Y a-t-il transfert des stratégies du jeu colonnes au jeu diagramme?
   Et, inversement, le jeu diagramme modifie-t-il les stratégies sur le jeu colonnes?
2) Est-ce que le diagramme de phase, comme outil d'exploration, aide au jeu de la stabilité?
3) Est-ce que le jeu de la stabilité a une influence sur le jeu ordinaire?

Les objectifs de cette expérimentation étaient principalement d'identifier les difficultés des élèves et leurs stratégies plus que les conditions de succès de notre approche. De plus, puisque la taille de notre échantillon ne permet aucune généralisation, nous avons décidé de nous limiter aux six équipes filmées et de les étudier en détail, d'après les bandes vidéo et commentaires des observateurs.

e) Résultats de la deuxième expérimentation et conclusions

La deuxième expérimentation a été l'occasion donc d'analyser en détail les stratégies de jeu de six équipes. Cette analyse révèle une évolution conforme à celle rapportée lors de la première expérimentation, avec une majorité d'équipes qui arrivent à une stratégie dans la région du diagramme de phase identifiée auparavant (figure 11b). L'analyse permet d'identifier également d'autres stratégies. Nous insisterons sur deux. Dans la première, on fait monter la colonne bleue à la limite de la catastrophe en pêchant les rouges presque jusqu'à épuisement du stock. C'est une stratégie efficace peu utilisée parce qu'à l'encontre du réflexe que développe les catastrophes souvent rencontrées dans les premiers jeux à cause de pêche excessive. Dans la deuxième, on ajoute des bleus à la limite de la catastrophe et pêche au maximum des rouges - c'est la stratégie vers lequel on tend la plupart du temps - jusqu'à un seuil en deçà duquel ça ne vaut plus la peine de pêcher étant donné la pêche proportionnelle. C'est ce que nous reconnaissons comme étant la stratégie optimale. Une seule équipe atteint cette stratégie en secondaire III. Le fait que le profit décroît au fur et à mesure des pêches est peu utilisé dans les stratégies de jeu et n'est pris en considération que tardivement dans le discours des élèves. Les stratégies identifiées en secondaire III sont données en appendice 5a. En appendice 5b est schématisée l'évolution de chacune des équipes de secondaire III avec leur résultat au jeu de la stabilité. Nous reprendrons ici l'essentiel de ces résultats.

Nous voulions vérifier l'impact du jeu de la stabilité sur le jeu colonne et aussi celui du diagramme sur les stratégies de jeu.

Le jeu de la stabilité

Il faut d'abord faire quelques remarques préliminaires quant au jeu de la stabilité. L'introduction du jeu avec ses consignes s'est avérée difficile.

Les élèves ne comprennent pas la consigne: ramener la population de poissons rouges entre les deux traits de manière à stabiliser le système. En fait, on ne comprend pas ce que signifie cette stabilité. C'est ce que révèle les observations lors des jeux. Plusieurs explications peuvent être données. On a rarement rencontré cette stabilité durant le jeu ordinaire car le but du jeu éloigne de cet état de stabilité. Dans le jeu ordinaire, on a développé une stratégie basée sur le mouvement contraire des colonnes dans de grandes oscillations. À travers le jeu ordinaire s'est développée une idée d'équilibration, de balancement ou de compensation du mouvement des colonnes pour maintenir le système hors catastrophe (cf. appendice 5a). Sauf peut-être quand cette idée s'est traduite par un jeu près de la stabilité, les stratégies se sont construites sur la base d'un dynamisme du système. Et l'idée de stabilité où plus rien ne bouge entre en conflit avec celle d'équilibre dynamique. Par ailleurs, même si on accepte cette idée de stabilité, on peut éprouver des difficultés à en réaliser l'état, les réflexes développés lors du jeu ordinaire (où le but est de faire de l'argent donc de faire monter haut) ne servent plus. C'est ce que nous révèlent les entrevues en secondaire I.

Notons de plus que dans le jeu de la stabilité, nous ne retrouvons pratiquement pas de référence au contexte. Une seule équipe que nous qualifions de «la plus contextuelle de secondaire III» explique: «*Quand i en a pas gros* (des bleus) *i mange pas gros (...) Quand i en a beaucoup, si c'est dans le bas i va en manger plus.*»

Le concept de la stabilité est difficile et trouve peu de support dans le contexte: comment stopper le mouvement; après tout, les rouges continuent à manger et les bleus à se faire manger! L'interprétation contextuelle en ces termes n'est plus possible. Il faut non plus penser individus, il faut penser population.

Quant aux stratégies, précisons que souvent on ne tient pas compte, dans un premier temps, de l'ensemble du cycle. On laisse descendre les rouges et on vérifie lorsque la colonne rouge arrive entre les deux barres, sans chercher à prévoir le mouvement des colonnes. Si finalement, on l'intègre à la stratégie, on cherche à égaliser les deux colonnes. En fait, dans le modèle utilisé, si le système est en état de stabilité alors la population de rouges égale la population de bleus (ou presque). Il aurait été plus intéressant que ce ne soit pas le cas.

La stratégie de réussite dominante, utilisée pour réaliser la stabilité, est une stratégie de pêche. On laisse les rouges atteindre un maximum et on pêche quand les bleus sont entre les deux traits. Les essais par ajouts de poissons bleus ou de poissons rouges sont sauf exception réalisés à la demande des observat urs.

Ceci dit, les résultats obtenus au jeu de la stabilité, dans le groupe ORD+ comme dans le groupe DIAG étaient prévisibles en cohérence avec notre cadre théorique. Nous ne pouvons mesurer l'impact du jeu de la stabilité sur le jeu des colonnes mais la stratégie sur jeu colonnes permet assez bien de prédire le comportement au jeu de la stabilité. (Pour plus d'information sur les stratégies utilisées au jeu de la stabilité, cf. appendice 5b) Deux équipes du groupe ORD+ qui ont une approche que nous pourrions qualifier de plus exploratoire, ont un certain succès, voire un grand succès, au jeu de la stabilité. Elles utilisent une stratégie de pêche qu'une des équipes expliquent dans ces termes: *«Plus les rouges montaient plus les bleus descendaient, quant ils* (les bleus) *étaient à peu près au milieu, on descendait les rouges et on vérifiait»*. Dans le jeu ordinaire, ces équipes ont constaté l'existence de différents cycles dans l'ampleur variable des oscillations en particulier grâce à une ou plusieurs surpêches. Ceci nous fait dire que le jeu du maximum ou du minimum aurait été profitable et peut-être mieux approprié pour susciter une exploration plus complète du système étant donné les commentaires plus haut sur la difficulté intrinsèque à la stabilité. Mais les deux équipes ont eu également l'occasion d'observer la stabilité lors du jeu ordinaire et le jeu de la stabilité, joué après chaque jeu ordinaire, a pu avoir un effet sur ce même jeu.

Ces équipes contrôlent bien les colonnes et considèrent dans leur raisonnement les états simultanés des deux variables du système. Il s'avère que leurs résultats au jeu de la stabilité n'est peut-être pas le fruit du hasard même si une équipe s'avoue mal à l'aise avec ce jeu. Par opposition et pour confirmer, une équipe du groupe DIAG confiné à la région du jeu optimal et dont la stratégie est établie dès les premiers jeux sur colonnes, n'arrive pas à réaliser la stabilité. Nous émettons l'hypothèse que plus vite on arrive à une stratégie optimale, plus fortes sont les habitudes acquises et plus il est difficile de s'en débarrasser pour jouer à établir la stabilité.

Et alors nous pensons que pour que le jeu de la stabilité ait un impact sur le jeu ordinaire il faut qu'il soit introduit le premier, avant le jeu sur colonnes.

Le jeu diagramme

Dans le groupe DIAG, nous avons trois équipes - trois comportements (cf. équipes D1, D2 et D3 en appendice 5b).

Une première équipe (D1) transfère sur le jeu diagramme le pattern de jeu utilisé sur le jeu colonnes. Cette équipe adopte une stratégie gagnante dès les premiers jeux sur colonnes et la maintient à travers toute l'expérimentation. Le passage au jeu diagramme s'est fait aisément sans problème. Son meilleur score est au jeu colonnes mais elle dit préférer le jeu diagramme qui lui fournit des repères pour éviter la catastrophe.

Cette équipe peut avoir intégré le diagramme à son raisonnement grâce à la séance de préparation au jeu ou, tout au moins, avoir compris dès cette séance son utilisation. Toutefois, comme nous l'avons déjà dit, cette équipe n'arrive pas à jouer le jeu de la stabilité.

Les deux autres équipes jouent sur colonnes et sur diagrammes deux jeux différents. Pour une équipe (D3), les deux jeux sont (apparemment) sans rapport. Cette équipe arrive sur colonnes à un jeu près de la stabilité. Sur diagramme, elle ne fait qu'explorer: on travaille tout azimut avec, vers la fin, une tentative de systématisation avec passage sur des courbes de plus en plus extérieures puis retour après vers l'intérieur par pêche et ajout de poissons bleus. Elle dit toutefois n'y rien comprendre. Cette équipe réussit assez bien le jeu de la stabilité.

Pour l'autre équipe (D2), le jeu sur diagramme a permis de jouer efficacement sur colonnes mais par l'intermédiaire d'une interprétation farfelue du diagramme. En effet, avant diagramme, le jeu sur colonnes en est un d'exploitation inconsidérée des rouges (-R, +R, -R, ...). Une fois observée un premier jeu sur diagramme la stratégie change et se développe parallèlement deux patterns de jeu selon qu'on joue sur colonnes ou sur diagramme.

Sur colonnes le pattern observé est le suivant: après pêche, on ensemence des bleus, puis des rouges, on «laisse monter» puis on repêche lorsqu'on a beaucoup de rouges.

Sur le diagramme, la stratégie consiste à pêcher lorsque le serpent est rouge puis à laisser avancer jusqu'à ce que le serpent soit redevenu rouge. Sur diagramme, il n'y a pas d'ensemencement. Nous trouvons dans ce qui suit une justification: *«Là* (elle montre le diagramme) *ils avancent pour nous les poissons tandis que dans l'autre c'est toujours nous qui fournit, c'est rare qu'ils montent les poissons»*.

En fait, les stratégies différentes relèvent des particularités visuelles des deux jeux et sont le fruit en particulier des caractéristiques visuelles du jeu diagramme: serpent qui se promène (sur des courbes non visibles), changement de couleur du serpent fonction du rapport R/B, disparition du serpent lors des pêches, pointillé (marquant les passages d'une courbe cachée à une autre cachée) illustrant les pêches, retour du serpent sitôt la pêche terminée.

Il semble que cette équipe ait interprété le diagramme de façon très particulière (pseudo-concrète), faute de comprendre ce qui se passe, et ait tenté de faire le rapport entre les deux jeux par l'intermédiaire du seul élément visuel commun, la couleur variable du bassin dans le jeu colonne et du point qui bouge [représentant le couple (R,B)], dans le jeu diagramme. Elles disent préférer le diagramme:

T: *«parce qu'on peut voir tout. L'autre on voit pas comment il dirige sauf en regardant juste les couleurs* (elle montre le bassin) *puis les côtés* (elle montre les colonnes). *Pi ici, on voit comment on avance* (elle suit du doigt la courbe de référence).»

D: *«oui, on a découvert plus vite qu'avec les colonnes. Ceux avec les colonnes, on eu de la misère à trouver lesquels aident le plus les rouges. Ça change pas des couleurs. Parque dans le diagramme, quand il change* (elle suit du doigt la courbe) *il change de couleur ce côté-là* (elle montre le diagramme) *et dans l'autre, il change aussi* (elle montre le bassin).»[10]

Il s'est créé alors des glissements contextuels majeurs, dans les données mêmes du jeu: on a réinterprété le jeu. On explique le jeu par le diagramme parce que, dit-on, on ne peut le faire par les colonnes.

D: *«Je laisse le serpent qui avance parce que quand le serpent est sorti, il a commencé à la couleur bleue.* (Elle indique ce qui correspond au point A sur la figure 13.) *Pis si je mange des rouges, il s'en va, il se déplace, il s'en vient par ici, là c'est des rouges.* (Elle simule avec son doigt le mouvement et indique le point B sur la figure 13). *Là tu manges pis ça augmente l'argent de plus que les bleus. Parce que quand je mange ce bleu là* (elle indique le point A) *ça mange 70. Pis quand j'attends pis qu'arrive le tour des rouges pis que je mange alors ça augmente.»*

FIGURE 13

Le nouveau jeu, joué sur diagramme, n'a pas créé de conflit chez les protagonistes puisqu'elles n'avaient plus à ensemencer (on leur fournissait les poissons) et que la pêche des bleus n'était pas possible.

Au jeu de la stabilité, cette équipe focalise son attention sur les rouges et revient à la stratégie de départ. Elle ne réussit aucun des essais effectués.

---

10 Les deux coéquipières ont beaucoup de difficulté à s'exprimer.

Il s'avère que le diagramme de phase n'est pas une garantie d'une plus grande exploration du système, il n'aide pas en effet à jouer au jeu de la stabilité et ne modifie pas les stratégies sur jeu ordinaire. Au contraire, la première stratégie utilisée par les élèves a créé des habitudes qui sont difficiles à déloger. Le jeu diagramme se révèle difficile et de nos constatations nous déduisons que le transfert du jeu colonne au jeu diagramme doit être soigneusement planifié.

6. AUTRES RÉSULTATS: PREMIÈRE ET DEUXIÈME EXPÉRIMENTATIONS (Secondaire I, III, V)

a) Le contexte

Nous voulions savoir dans quelle mesure les élèves s'appuient sur le contexte pour jouer. Or, il n'est pas facile de répondre directement à cette question. Nous pouvons cependant tenter de cerner la nature des indices verbaux utilisés. Mais avant, donnons trois résultats qui déjà se dégagent de la lecture des protocoles.

D'abord, Secondaire I apparaît plus «contextuel» que secondaires III et V. Plusieurs explications peuvent être données: ceci peut dépendre de la présentation du jeu à l'aide du contexte qui, en secondaire I, a été très variable. Ceci peut dépendre aussi d'une attitude plus enthousiaste de secondaire I qui a donné plus d'indices verbaux... Mais il se peut que cette caractéristique soit effectivement fonction du niveau: les niveaux plus élevés ayant une tendance plus «symbolique» (qui dépasse le contexte) même si celui-ci peut rester en arrière-plan des stratégies.

Deuxièmement, les références contextuelles sont liées au système rouge-bleu; il n'y a pas, par exemple, de référence contextuelle en rapport avec la pêche proportionnelle, ni en rapport avec une quelconque exploitation économique.

Troisièmement, l'expérience en secondaire V avait amené les enseignants à s'interroger sur les transferts possibles entre les divers systèmes caractérisés par des rétroactions: système économique et système écologique. Nous n'avons pas observé de tels transferts. Par ailleurs, le système écologique utilisé dans l'enseignement (mouettes-poissons) a été repris dans le jeu qui ne concernait que des poissons.

Résultats: nature des indices verbaux utilisés

Faute de pouvoir mesurer l'importance du contexte dans les stratégies de jeu, nous pouvons distinguer différents niveaux quant à la nature des indices verbaux utilisés en fonction du contexte de jeu dans lequel ils interviennent. Nous en trouvons quatre.

Le premier niveau en est un de désignation des **actions** et des **faits** en rapport avec les divers éléments du contexte

Nous y trouvons les références contextuelles liées aux actions sur le jeu (semer, pêcher), les références contextuelles liées à un état particulier du système tels que trop de poissons ou catastrophe écologique (ces commentaires sont d'ailleurs inscrits à l'écran) et les références contextuelles en rapport avec la présentation du contexte (poissons bleus, poissons rouges, les rouges mangent les bleus, les bleus se font manger, les bleus ne mangent pas les rouges). Il n'y a pas, à ce niveau, de référence au mouvement des colonnes.

Ce niveau est atteint par pratiquement tous, dans les indices verbaux qu'ils utilisent. On désigne les états, les actions, les éléments du jeu sans la dynamique du jeu. Ce premier niveau ne sous-entend toutefois pas une incapacité à jouer le jeu.

Au deuxième niveau, nous plaçons les interprétations contextuelles du mouvement des colonnes, en termes de **montées et descentes**, ainsi que de la **conséquence** (sur les rouges) **d'ajouter des bleus**.

On dira quand la colonne bleue descend, que les bleus se font manger, quand la colonne rouge monte, que les rouges mangent ou qu'ils se reproduisent parce que..., quand la colonne bleue monte, que les bleus se reproduisent parce que... et quand la colonne rouge descend, que c'est parce que les rouges n'ont plus assez de nourriture. On dira aussi qu'on ajoute des bleus pour faire manger les rouges (sous-entendu pour les faire monter).

L'interprétation par rapport au contexte des conséquences d'autres actions que celles d'ajouter des bleus, apparaissent plus tard dans le jeu et chez moins de sujets. Pour ces raisons, nous la situons à un niveau supérieur. Le deuxième niveau est atteint par la plupart des sujets. Certains toutefois n'iront pas jusqu'à parler de reproduction et se limiteront à «manger» et «se faire manger» pour expliquer le mouvement des colonnes.

Par ailleurs, des mouvements de colonnes induisent des interprétations étranges du contexte. On dira que les rouges descendent parce qu'ils n'ont plus faim ou qu'ils arrêtent de manger parce qu'ils sont fatigués (car après tout, il reste encore de la nourriture). Il peut se produire des glissements contextuels où à l'occasion la taille des poissons prend la relève de la taille de la population et où le comportement individuel est substitué au comportement de la population.

L'interprétation contextuelle du mouvement des colonnes n'est pas simple justement du fait qu'on observe des populations. À ce niveau, nous tirons deux résultats:

- Le mouvement où la colonne rouge monte et la colonne bleue descend est celui qui amène le plus de références contextuelles. C'est en fait celui qui s'interprète le plus aisément par rapport au contexte. Bien qu'on dira plus facilement la colonne rouge monte parce que les rouges mangent, que ça monte parce qu'ayant à manger, ils sont dans de bonnes conditions et se reproduisent bien.
- La difficulté d'expliquer certains mouvements de colonnes par le contexte amène des glissements contextuels majeurs. Ce peut être des affirmations contextuelles rapides mais qui se manifestent pour des mouvements de colonnes et pas pour d'autres.

À ce que nous appelons le troisième niveau, des références contextuelles servent pour caractériser le mouvement des colonnes et des conséquences d'actions, en termes de **vitesse de montée** et de **hauteur**.

On dira «plus on donne à manger plus ça monte haut (vite)» ou «... plus ça se reproduit vite». On dira aussi «moins on donne à manger moins ça monte haut».

Comparativement aux niveaux précédents, ce niveau est atteint par moins de sujets selon les indices verbaux qu'ils utilisent.

Au quatrième niveau, des références contextuelles sont utilisées **pour construire ou justifier une stratégie** d'actions, basée sur le mouvement des colonnes et les états des deux populations.

Les extraits de protocoles suivants illustrent ce quatrième niveau.

Sec. I, M et M, 4e jeu, 1re observation:

«quand c'est pas mal égal, c'est les rouges qui gagnent... quand on a un petit peu de bleus... là, du moment qu'on en a un peu de bleus... les rouges en ont assez pour manger, quand ils mangent ils augmentent vite... faut quand même qu'ils aient assez de bleus pour qu'ils mangent... là ils mangent pas fort... les bleus descendent... mange-z-en ... pêche-z-en, ok... pas des rouges ça va te coûter cher» (...)

«là ça marche notre affaire ... laisse les en manger un peu de bleus ... mais non, faut qu'il y ait moins de rouges que de bleus ... bon OK, les rouges commencent ... c'est parce qu'on attend pas mal ... tu sais la manière que ça marche ... les bleus aussi augmentent ... là, ils descendent, les rouges commencent à les manger ... on va mettre une couple de bleus ... les beaux gros bleus ... regarde, automatiquement les rouges aussi montent ... ils peuvent les manger ... ils ont plus de nourriture ... tu vas trop vite ... non c'est correct.»

«mange-z-en... on est à moitié et on a 10000$... (interviewer: tantôt tu as dit que tu avais trouvé un truc) si il se trouve à avoir un peu plus de bleus et un peu moins de rouges... si on met moins... si on en mange beaucoup d'un coup, ça va faire que eux autres y vont avoir plus de nourriture et qu'ils vont se multiplier plus vite... c'est un peu ça... quand on a trop de bleus, aussi faut faire attention... (interviewer: qu'est-ce qui arrive si) ... les rouges... bien si on a trop de bleus, c'est qu'on a pas assez de rouges probablement... faut semer des rouges... c'est qu'il n'y a pas assez de rouges pour manger tous les bleus probablement .. faut semer des rouges s'il y a trop de bleus... 29000$ c'est quoi votre truc»

Sec. I, S et S, 6e jeu, 2e observation:

«ah non, je ne voulais pas mettre tout ça... je me suis trompé... j'aurais pas dû faire ça, il va y avoir une catastrophe... je le savais... j'ai pas voulu mettre trop de poissons... j'ai pesé trop longtemps dessus... j'ai mis trop de bleus (interviewer: catastrophe) il y a trop de bleus... fait que les rouges ils n'ont pas assez de place... ils sont trop tassés... les rouges ne sont pas pour les manger, il y a trop de bleus pour les rouges... s'il y a 5 rouges et 500 bleus, les rouges n'ont pas d'appétit pour 500 bleus... on ne la comptera pas... j'en ai trop mis des bleus»

Sec. III, O3, Y et D, 3e jeu:

Y: *«Quand ça monte c'est bon. On sème tout de suite.»*
D: *«Une p'tite shot, pas trop. I sont déjà rouge. Les rouges vont manger en St-C. là.»*
Y: *«On va pêcher pas mal parce qu'i sont en train de tout gober.»*

M et M se réfèrent à trois zones précises d'action: 1) si on a autant de rouges que de bleus, les rouges gagnent, de même 2), si on a moins de bleus que de rouges, mais quand même assez, les rouges mangent les bleus et les rouges montent vite, et de même 3), si on a moins de rouges que de bleus, mais assez de rouges, les rouges ont beaucoup de nourriture et les rouges montent vite. Il faut assez de bleus pour nourrir les rouges et assez de rouges pour manger. On est grossièrement dans le «premier quadrant» du diagramme de phase. De plus, l'extrait de protocole montre comment M et M prennent en compte le mouvement des colonnes et comment le contexte leur sert constamment de référence.

S et S expliquent que s'il n'y a pas assez de rouges pour le nombre de bleus, ils ne pourront les manger, question d'appétit! Leur discours reflète comment est utilisé le contexte pour expliquer la catastrophe.

Quant à Y et D, leur argumentation est la suivante: plus les rouges sont hauts (dans la colonne), plus les bleus vont se faire manger (ils vont descendre), il faut donc pêcher pour empêcher les rouges de tout manger (et donner la chance aux bleus de remonter).

Ces réflexions dénotent sans doute une certaine compréhension du système. Elles nous apparaissent en grande partie le fruit d'un raisonnement sur les situations catastrophiques. Les catastrophes s'expliquent contextuellement (contrairement à la stabilité): les élèves y voient une conséquence du rapport rouges/bleus. Notons que ce rapport rouges/bleus est illustré concrètement par la couleur du rectangle central et certains élèves s'y référeront pour anticiper les catastrophes ou pour identifier un état propice ou non à une action envisagée.

Pour les différents niveaux identifiés, comme on a pu le constater, le langage utilisé en référence direct avec le contexte diffère peu d'un à l'autre: on parle strictement de «manger» plus ou moins. Par contre, le contexte de jeu lors de ces interventions verbales se situe vraiment, lui, à des niveaux différents. L'étude des indices verbaux utilisés en référence au contexte a donc permis de découvrir des niveaux de raisonnement sur le jeu même si, encore une fois, le niveau où se trouve un sujet n'est pas nécessairement en rapport avec sa performance au jeu et ne correspond pas nécessairement à celui que révèle les indices verbaux qu'il utilise: car il a pu jouer très bien sans se référer au contexte ou jouer en référence constante au contexte sans en donner d'indices verbaux.

b) Les catastrophes

L'expérience des catastrophes est déterminante dans l'élaboration des stratégies. La peur de la catastrophe conduit dans un premier temps à un jeu près de la stabilité. Lorsque le joueur sort de ce jeu prudent, pour jouer à la limite de la catastrophe, il conserve l'idée de coordination des deux colonnes en maintenant un certain «équilibre» du mouvement: pas pêcher trop bas, pas faire monter trop haut. Les extraits de protocole qui précèdent et d'autres donnés en appendice 5a (Ib) montrent que les élèves expliquent leur jeu en référence à ces situations catastrophiques. Les catastrophes mènent à une réflexion sur l'état relatif des deux populations et à une stratégie de jeu.

On dira qu'il faut surveiller les bleus, que les rouges ne doivent pas être trop bas, qu'il ne faut pas mettre trop de bleus, qu'il ne faut pas que les rouges montent trop haut, qu'il faut balancer ou équilibrer le mouvement des colonnes par opposition à débalancer ou déséquilibrer ce mouvement ce qui arrive lors des catastrophes. Nous pensons que même l'identification de la zone de jeu est souvent la conséquence de l'expérience des catastrophes: *«on s'arrange pour que les rouges soient plus bas que les bleus pour que les bleus montent plus vite»* (secondaire III, O2). On a constaté qu'il y a danger de catastrophe après surpêche, qu'alors les bleus montent vite.

Comment aurait-on joué sans? Nous émettons l'hypothèse que l'évolution vers une stratégie «optimale» (relativement à chaque équipe) aurait été plus lente. La catastrophe par

surpêche plus particulièrement apporte très tôt l'information «plus rouge est bas plus bleu monte haut» donc amène la nécessité de surveiller les bleus et d'envisager les conséquences d'une action sur les deux populations.

Toutefois, il peut s'en suivre des prédictions fausses quant au mouvement des colonnes ou, tout au moins, des doutes chez les élèves quant à leurs prédictions. À la demande de l'observateur (2e observation), M et M (Secondaire I explique leur jeu en se référant à la catastrophe.

«(...) on a décidé de semer des bleus (...) comme ils ont plus de nourriture pour les rouges, ça les fait progresser plus vite, on peut manger ... du moment qu'on garde le niveau entre les deux ... comme ça, là ... si disons, on en mange trop et il y en a trop de ce côté-là, ça va baisser au lieu d'augmenter parce que c'est ceux-là qui vont progresser (intervention: *si tu manges trop de rouges?*) *bien ... ils vont régresser au lieu de progresser ... il me semble en tout cas ... s'il y a trop de bleus il n'y aura pas assez de rouges pour manger tous les bleus.»*

Ceci est vrai à la limite seulement. M et M évaluent ce qui se passe en termes d'assez et de trop pour prédire le mouvement des colonnes. Ils n'ont toutefois pas les moyens de s'en assurer.

c) Les valeurs numériques (gestion de l'entreprise)

Outre le contexte écologique, il y a aussi un contexte «économique». On a des valeurs d'argent qui déterminent immanquablement le jeu puisqu'il s'agit, dans ce jeu, de faire le maximum de profit.

Nous distinguons malgré tout des niveaux dans l'utilisation ou le contrôle de ces valeurs numériques. Nous avons résumé ces niveaux dans le tableau qui suit. Il y en trois, caractérisés par les constats faits par les élèves. À chaque fois sont donnés les impacts de ces constats sur les stratégies.

Constat sur les valeurs numériques			Impact sur la stratégie
I	ensemencer coûte	ajouter des rouges (+R) ou des bleus (+B) coûtent	• Contrôle dans l'ajout de R et de B • Voir «laisser aller» pour ne pas dépenser
		R coûtent plus cher que B et beaucoup plus cher	• Abandon de +R • +B parce que pas assez d'argent pour +R
	pêcher rapporte	pêcher R rapporte	• Il faut pouvoir pêcher beaucoup donc avoir beaucoup de R
II	Profit fonction d'une pêche proportionnelle	le profit décroît quand R descend	• Pêcher quand R haut (dans la colonne) • Ne pas pêcher quand R bas ou ne pas faire descendre R trop bas, ça ne vaut pas la peine
III		le profit décroît au fur et à mesure des pêches plus je pêche moins il y a de poissons; moins je peux pêcher de poissons, moins je peux faire de profit	• Contrôle des pêches en fonction du profit: évaluation d'un point stratégique (seuil de profit) au-delà duquel ça ne rapporte plus assez compte tenu de la stratégie globale

R: poissons rouges ou colonne rouge

B: poissons bleus ou colonne bleue

Le niveau I est atteint par tous à moins d'exception. Le niveau II nécessite souvent, pour être atteint, l'intervention d'un observateur et le lien profit-pêche proportionnelle tarde à être intégré à la stratégie. La pêche proportionnelle est elle-même très rarement notée: *«regarde là ce que ça fait... au début ça fait perdre quatre lignes à chaque fois que tu pêches, à la fin une ligne...»* (Sec. V). On parlera plus souvent du profit: *«plus c'est haut, plus on fait du profit»* (Sec. V). En fait, l'association profit-pêche proportionnelle reste peu claire et quelquefois apparaît ambiguë ou étrange: *«i faut pêcher avant que les points rebaissent, quand tu pêches pas, ça redescend tout seul»* (Sec. III-O2). Peu atteigne le niveau III, c'est-à-dire le contrôle de la variable profit à l'intérieur de leur stratégie de jeu. Cette stratégie s'est révélée gagnante en secondaire III.

Après analyse, il nous semble que les valeurs numériques paraissent mieux contrôlées, mieux saisies, chez ceux qui ont une stratégie de démarrage qualifiée déjà d'«évoluée». En fait, ceux qui piétinent dans des stratégies peu évoluées ne maîtrisent pas bien dès le départ les éléments de base du jeu qui leur ont été présentés.

Les valeurs numériques ont un rôle déterminant dans la maîtrise du jeu. Une question se pose alors: peuvent-elles avoir le rôle le plus déterminant? Avoir un rôle plus déterminant que le contexte et le mouvement des colonnes? Nous pensons que non car on s'explique et on prédit le mouvement des colonnes indépendamment de celles-ci (les valeurs numériques) et amplement dans les stratégies dites évoluées, lorsqu'il y a indices verbaux. Ce ne sont pas elles, les valeurs numériques, qui donnent le sens.[11] Par contre, elles contraignent l'exploration du système ce qui devient un handicap important pour la compréhension du système à rétroaction dans la totalité de son cycle et dans ses différents cycles.

Par ailleurs, lorsque plusieurs équipes jouent en même temps, une concurrence pour obtenir le meilleur score s'installe et motive d'une manière certaine la recherche d'une stratégie optimale.

d) L'évolution du système et la rétroaction

Nous démarrions cette expérimentation avec deux a priori.

1) Comprendre un système à rétroaction c'est pouvoir en donner les caractéristiques, en décrire l'évolution et pouvoir prédire les conséquences de ses actions sur le système (en rapport bien sûr avec le modèle utilisé).

---

[11] Notons qu'il n'existe à peu près pas de références au contexte en rapport avec les valeurs numériques. En voici toutefois un exemple: *«... plus ton poisson rouge va être rare, plus il va être cher... non ça marche pas comme ça... ça c'est un beau système»* (secondaire V, au début, avant 1er jeu).

2) Un jeu efficace correspond à une bonne compréhension de l'évolution du système.

Nous avons ajusté notre position sur ce deuxième point. La première expérimentation nous a révélé que le jeu ne permettait en fait qu'une exploration limitée du système. On s'en tient à des constats d'effets sur une population, d'action sur l'autre: constatations vraies dans la zone de jeu identifiée comme rapportant beaucoup d'argent. Nous avons voulu inciter les élèves à une plus grande exploration du système en ajoutant le jeu de l'équilibre. Mais ce jeu a mal été compris. Le jeu des maxima ou des minima auraient pu être plus pertinent comme nous le suggère l'entrevue avec Aristide.

Nous voulons maintenant nous attarder sur les caractéristiques du système que les élèves ont pu observer, certains tout au moins, et de tenter de voir comment ils parlent de la rétroaction.

Nous ne pouvons certes évaluer exactement ce que les élèves retiennent du système et de ces caractéristiques ou comment ils se représentent ce système à rétroaction. Les commentaires des élèves fournissent peu d'énoncés sur les caractéristiques du système. En fait, il apparaît clairement maintenant que **notre didacticiel est un jeu d'action et non un instrument de réflexion sur les actions**. On formule les conséquences d'actions sans parler du système lui-même. On dit par exemple, *«plus on donne à manger aux rouges, plus ils montent»* mais on dira peu *«plus les bleus montent haut, plus les rouges montent haut»*.

Une deuxième constatation s'impose d'elle-même. Les commentaires concernent le plus souvent le changement graphique à l'écran et comme nous l'avons dit précédemment, il n'est pas toujours facile d'y coller une interprétation en rapport au contexte. Nous ne pouvons mesurer dans quelle mesure le système couleur rouge - couleur bleue, à règle arbitraire, révèle une compréhension du système poissons rouges - poissons bleus. Mais nous pouvons certainement donner les caractéristiques du système observées assurément par au moins quelques élèves, comme ils en témoignent.

Les élèves constatent des maxima et des minima. Ils constatent que *«les rouges suivent les bleus»*. Plusieurs élèves ont observé des vitesses différentes de montées ou de descentes. On a, à l'occasion, parler de reproduction rapide mais aussi d'appétit! Malgré la difficulté qu'implique la notion et les glissements qui se produisent conséquemment, il y a donc des références indirectes aux taux de variation des populations.

Nous savons que des élèves ont observé différents cycles et pouvaient suivre une évolution dans le temps des deux populations. Aristide, de secondaire I, en est un exemple. Il pouvait même prédire assez bien le résultat d'une action sur une population, non

seulement sur l'autre population mais sur elle-même. Il envisageait donc un effet à long terme. Il n'est pas sûr toutefois, qu'il ait pu réaliser que les effets dépendent des états. Plusieurs élèves précisent quelles doivent être leurs actions en fonction des états des deux populations, l'une par rapport à l'autre (ensemble de couples du diagramme de phase). Nous donnons des extraits de protocoles dans la section sur le contexte (cf. 6a). Mais, il nous semble que les repères donnés découlent d'une stratégie d'évitement des catastrophes et il n'est pas sûr que ces mêmes élèves puissent prédire correctement les effets des perturbations quels que soient les états. Des prédictions fausses pourraient d'ailleurs en découler: ce qui est vrai à la limite de la catastrophe, ne l'est pas nécessairement toujours.

Comme Aristide, certains ont pu donner des indices de «compréhension» de la rétroaction. Il a agi d'une manière sur une population pour retrouver un effet contraire à long terme sur cette même population. Peu d'élèves ont témoigné d'une telle compréhension. Comme nous l'avons déjà dit, plusieurs se sont limités à constater les effets sur le système de certaines de leurs actions. En fait, nous distinguons ici aussi des niveaux selon la longueur de la suite d'inférences qui est donnée par l'élève, suite à une action posée. En voici des exemples:

1) Niveau action-réaction: plus on donne à manger aux rouges, plus ils mangent (plus la colonne rouge monte); plus on pêche, plus la colonne bleue monte haut.
2) Niveau action-réaction-rétroaction: plus on pêche, plus la colonne bleue monte haut et en conséquence plus la colonne rouge monte haut.
3) Niveau double rétroaction: plus la colonne bleue monte haut, plus la colonne rouge monte haut, et plus la colonne bleue descend bas et plus la colonne rouge descend bas. C'est le cas d'Aristide.

On peut ici sentir un malaise. La rétroaction que présente le jeu se conçoit dans la perturbation du système. Les notions vaguement construites, le sont dans un cadre d'action. Si nous avons pu constater des possibilités de ce jeu, pour amener une certaine compréhension, et si, à l'occasion, nous avons constaté une telle compréhension, reste que nous ne savons comment les élèves peuvent décrire le système qu'ils voient évoluer et si même sans l'action les notions persistent. **Une étape d'analyse s'impose et le diagramme de phase, malgré les résultats décevants que nous en avons obtenu, reste un outil important d'analyse à fournir aux élèves.**

7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

a) Utilisation du jeu en classe

Nos résultats d'expérimentation nous mènent à la conclusion que le jeu ne peut être introduit sans le support d'un professeur. Nous croyons en effet que pour que le jeu ait une utilité pédagogique, il doit être intégré à une séquence d'enseignement organisé par un professeur. Il peut être utilisé comme amorce pour explorer des idées qui sont difficiles, et point de départ à des discussions, avant toute présentation par le professeur des notions rattachées aux systèmes à rétroaction. Ou bien, il peut être utilisé pour vérifier ou tester des hypothèses auxquelles on est arrivé en classe. Le jeu doit être considéré comme un environnement d'exploration qui met en contact avec les relations de base proies-prédateurs d'un écosystème. Ainsi il peut paver la voie à des habiletés de modélisation plus quantitatives à être présentées, elles, à la fin de l'école secondaire ou du collège. Notre jeu est essentiellement une première occasion d'exploration des représentations de l'évolution de système.

Avec la description dynamique de l'évolution à l'aide des colonnes, il conduit entre autres à l'introduction de la représentation plus abstraite qu'est le diagramme de phase.

b) Compréhension des systèmes à rétroaction et potentialités de notre approche

Malgré des résultats expérimentaux décevants, notre approche a de grandes possibilités qu'à l'occasion nos observations laissent entrevoir. Notre approche a deux caractéristiques fondamentales: elle est **interactive** et elle place au premier plan l'**évolution** du système à rétroaction. Ainsi, elle permet une exploration de cette évolution: c'est sa puissance. Le mouvement des colonnes procure une bonne base rendant possible une analyse correcte des taux de variation: ça va vite, ça va lentement, ça ralentit, ça accélère... Il montre également l'amplitude dans la grandeur des deux populations. Il montre que les changements dans les deux populations sont liés. À la section 6d, nous avons déjà souligné ces points. Tout ceci est renforcé par la version diagramme de phase du mouvement des colonnes. Nous croyons que la double référence possible, colonne et diagramme de phase, ajoute à la compétence des élèves pour décrire l'évolution des systèmes et les conséquences de perturbations.

Le diagramme de phase montre qu'à un ensemble initial de populations est attaché un parcours et que changer une des populations mettra le système sur un autre parcours. Il montre que le système se trouve sur une trajectoire fermée - parmi d'autres trajectoires

«concentriques» qui déterminent son évolution. La périodicité du phénomène s'associe alors à des courbes fermées. À chacune de ces courbes correspond une manière d'être en équilibre dynamique.

Le diagramme permet de découvrir un point central où le système ne bouge plus. Les colonnes sont alors immobilisées. Dans l'équilibre dynamique, qu'illustre le mouvement des colonnes, existe donc un point de stabilité.

Le jeu avec diagramme permet donc de conceptualiser l'équilibre dynamique de deux façons: un pattern régulier et une courbe fermée. Les séries d'états d'équilibre sont illustrées par les courbes concentriques sur lesquelles le système évolue.

Ceci conduit les élèves à prendre conscience **que les actions sur une population peuvent avoir deux effets différents sur l'autre.** Une même action peut amener le système vers plus de stabilité ou plus d'instabilité selon l'état dans lequel se trouve le système au moment où l'action est posée. En changeant une population, on peut ou bien bouger vers l'intérieur de la courbe fermée, dans quel cas le système est amené vers plus de stabilité, ou bien vers l'extérieur de la courbe et alors le système est amené vers moins de stabilité. Dans ce dernier cas, une courbe fermée plus grande correspond à de plus grandes amplitudes dans le mouvement des colonnes. Comme conséquence écologique fondamentale, changer un système en supprimant presque totalement une population peut résulter en un accroissement dangereux de la population qu'on voulait exterminer.

Un examen plus minutieux du diagramme de phase peut même suggérer que les maxima et minima sont tous colinéaires (vertical ou horizontal) avec le centre d'immobilité du système. En termes de mouvement des colonnes, ceci signifie que chaque fois qu'une colonne atteint un extremum l'autre est au centre de stabilité (ce dont certains élèves ont vraisemblablement eu l'intuition durant notre expérimentation).

Une approche basée sur l'exploration de l'évolution d'un système, avec toute l'information qu'on peut en tirer, peut même s'inscrire dans une démarche de modélisation, comme nous l'avons déjà dit.

c) La modélisation

Une discussion sur la validité du modèle de Lotka-Volterra, en termes de patterns obtenus dans le diagramme de phase, peut en classe se greffer à l'exploration du système. Y a-t-il un sens écologique à penser que toute paire de populations restera à évoluer autour d'un point de stabilité? Les populations n'auront-elles pas tendance à tendre vers cette état

de stabilité? Des vérifications expérimentales s'imposent. Mais on peut se poser la question, quel type de diagramme de phase pourrait mieux rendre compte de ce retour à l'équilibre? En fait, converger vers plus de stabilité correspond à des évolutions qui spiralent vers le point de stabilité (figure 8c). Cette convergence dépendra des populations mixées et du milieu spécifique dans lequel elles se trouvent. Cette évolution en spirales, c'est exactement le comportement du système qu'on obtient lorsqu'on introduit dans le modèle de Lotka-Volterra un niveau de saturation pour la population des proies («checked growth»).[12] Dans un processus de modélisation en classe, on peut ainsi construire des modèles de plus en plus sophistiqués pouvant rendre compte de différents comportements de systèmes en travaillant sur les équations.

Continuons l'analyse de notre modèle. Des discussions que nous avons eu avec le docteur Schaefer et différentes lectures effectuée plus tard [Abraham and Shaw (1984); May (1978)] nous suggèrent que le modèle de la spirale est souvent inapproprié. Par ailleurs, l'utilisation que nous faisons du modèle de Lotka-Volterra apparaît légèrement incorrect et ne peut être vérifié dans la nature. En fait, il semble que dans la plupart des cas, le système n'évolue pas sur cet ensemble de courbes concentriques de notre diagramme de phase, en se plaçant sur une courbe différente suite à une perturbation et y restant une fois le système laissé à lui-même. Le modèle de Lotka-Volterra représente plutôt le système lorsque celui-ci a atteint son équilibre dynamique. En d'autres mots, pour une paire de population initiales, si on s'éloigne du chemin d'équilibre, le système revient à sa trajectoire initiale spiralant ver l'intérieur ou vers l'extérieur (voir figure 14).[13]

---

12 Dans l'équation 1a' de l'appendice 1, k_1 devient $\frac{M - f(t)}{M} k_1$ où M représente le maximum de lièvres (saturation).

13 Voir modèle de Hoiling-Tanner présenté dans Spain et Soldan (1983).

FIGURE 14

Nous pourrions poursuivre en élaborant sur tout un domaine d'étude qui est celui de la géométrie des systèmes dynamiques, avec la notion d'attracteurs. Nous reportons le lecteur à Abraham et Shaw (1984): «The key to the geometric theory of dynamical systems is the phase portrait of a dynamical system ... [qui décrit] all possible states of the system: the state space.» Les représentations d'évolution à la base de notre approche sont des exemples simples qui illustrent aisément une analyse géométrique de systèmes à équilibre dynamique. Même avec le pendule, considéré comme système, le diagramme de phase donne trois courbes, en trois dimensions, montrant comment la distance à l'origine, la vitesse et l'accélération varient.

d) Conclusions et suites à donner

Une idée centrale de l'étude des écosystèmes, est la notion d'équilibre dynamique. Elle doit être patiemment construite à l'encontre du concept prédominant de l'équilibre statique ou de la stabilité. Comme nous l'avons montré, notre approche est propice à une exploration fructueuse de cette notion et de deux façons, à l'aide du mouvement des colonnes et à l'aide du diagramme de phase, ce dans un environnement interactif. Mais même si beaucoup peut être fait à l'aide seulement des diagrammes de phase, nous ne prétendons pas que ce soit suffisant. L'analyse des représentations de caractérisation d'un écosystème doivent également être introduites éventuellement. Différentes conférences auxquelles a participé le responsable du projet, ont permis de voir plus précisément le rôle que notre jeu pouvait jouer dans le développement de comportements de modélisation. L'aller retour entre les représentations de définition ou de caractérisation (équations, programme LOGO, STELLA, ...) et les représentations d'évolution, pour tester des hypothèses, apparaît un défi majeur pour une activité de modélisation qui implique des

habiletés telles que la coordination d'un grand ensemble de représentations ou le passage de l'une à l'autre. Une attention particulière doit bien sûr être apportée aux comportements requis pour effectuer ces transferts d'une représentation à l'autre. Il nous semble maintenant que l'exploration de l'évolution de systèmes, avec un ensemble de représentations d'évolution équivalentes, dans un contexte significatif, est une approche qui encourage des compétences de transfert précieuses en modélisation.

Nous envisageons donc des développements ultérieurs à notre jeu. Le jeu sur colonnes et avec diagramme de phase peuvent servir d'introduction à l'étude d'autres systèmes plus complexes, en économie, en biologie, en gestion, en physique, etc. Il pourrait être intéressant d'insérer différents contextes et de rendre ainsi le jeu plus propre à être utiliser dans des cours autres que l'écologie ou les mathématiques.

Mais vite interviennent des systèmes à plus de deux variables. Il est possible de créer une version du jeu actuel en y intégrant une troisième variable, ce qui suppose un diagramme en trois dimensions.

Enfin, comme nous l'avons déjà souligné, il est souhaitable de donner accès à l'élève à différentes représentations. Nous pouvons en particulier ajouter au jeu actuel une version avec graphique multi-courbes. On peut aussi permettre à l'élève d'accéder à des représentations de définitions telles que l'équation, par exemple. Le modèle peut être présenté en boîte noire, comme c'est le cas actuellement, mais l'utilisateur pourrait aussi avoir accès non seulement aux paramètres du jeu, pour les modifier, mais également aux équations. Nous pensons alors à la possibilité d'utiliser d'autres modèles que celui déjà proposé, un modèle correspondant à une évolution en spirale par exemple. Des travaux futurs devraient s'appliquer à la tâche d'assurer le lien entre les représentations d'évolution et celles de définition.

BIBLIOGRAPHIE

Abraham, R.H., Shaw, C.D. (1984). *Dynamics, the Geometry of Behavior: Part One: Periodic Behavior*. Santa Cruz, California, Aerial Press.

Baker, G.L., Gollub, J.P. (1990). *Chaotic Dynamics: an Introduction*. Cambridge University Press.

Bellman, R. (1964). Control Theory. *Scientific American*, septembre.

Bertin, J. (1967). *Sémiologie graphique*. Mouton, Gauthier-Villars, Paris.

Braunschweig, B. (1985). *La simulation sur micro-ordinateur: les modèles dynamiques des systèmes*. Eyrolles, Paris.

Denham-Preece, J. (1978). Predator-Prey Relationships, *in* M.E. Leveridge (Ed.): *Computer in the Biology Curriculum*.Edward Arnold.

Forrester, J.W. (1973). *Principles of Systems*. Cambridge, Massachusette: Wright-Allen Press Inc.

Girardon-Morand, C. (1987). *Une étude des conceptions rattachées à la notion de transformation*. Mémoire présenté à l'Université du Québec à Montréal comme exigence partielle de la maîtrise en mathématiques, septembre.

Janvier, C. (accepté pour publication). The Use of Interactive Software for the Exploration of Simple Feedback Systems, *in* D.L. Ferguson (Ed.): *Advanced Technologies in the Teaching of Mathematics and Science*. Advanced Technologies in the Teaching of Mathematics and Science. NATO Advanced Research Workshop, England: July.

Janvier, C. (1978). *The interpretation of complex cartesian graphs representing situations - studies and teaching experiment*. Ph.D. dissertation, University of Nottingham.

Janvier, C., Garançon, M. (1989). Graphical Understanding of Simple Feedback Systems, *in* T. Eisenberg & T. Dreyfus (Eds): *Focus on Learning Problems in Mathematics.11(1-2)*.

Kerslake, D. (1977). *The concept of graphs in secondary school pupils aged 12-14 years*. M. Phil. thesis, Chelsea College, University of London.

Koçak, H. (1986). *Differential and Difference Equations through Computer Experiments*, (with Diskettes Containing PHASER), New York, Springler-Verlag.

May, R.M. (1978). Mathematical Aspects of the Dynamics of Animal Populations, *in* S.A. Levin (Ed.): *Studies in Mathematical Biology, Part II*. The Mathematical Society of America.

Pentony, P. (1985). Gregory Bateson and Cybernetics, *in* W. Maxwell (Ed.): *Thinking, the Expanding Frontier*. The Franklin Institute Press.

Ponte, J. (1985). Geometrical and Numerical Strategies in Student's functional Reasoning. *Proceedings of the Ninth PME conference*, Noodwijkerhout, Holland.

René de Cotret, S. (1985). *Étude historique de la notion de fonction: analyse épistémologique et expérimentation didactique*. Mémoire de maîtrise présenté à l'Université du Québec à Montréal, avril.

Rosney, J. de (1975). *Le macroscope. Vers une vision globale*. Paris: Éditions du Seuil.

Schaefer, G., Eulefeld, G. (1978). *Biological Equilibrium*, Teaching Unit. The Institute for Science Education, University of Kiel.

Schecker, H. (1992). The didactical Potentiel of Model-Building Systems for Physics Education, *in* David L. Ferguson (Ed.): *Advanced Technogies in the Teaching of Mathematics and Science, (7)*, published by Springler-Verlag, printemps.

Spain, J.D., Soldan, T. (1983). *Predation*. The University of Iowa, CONDUIT.

STELLA 2.0 - Software for education. High Performance Systems, 13 Darmouth College Highway. Lyme, NH, USA 1987.

Tinker, F.R. (à paraître). Measuring and Modelling, *in* David L. Ferguson (Ed.): *Advanced Technologies in the Teaching of Mathematics and Science, (12)*, published by Springer-Verlag, printemps.

Vitale, B. (1988). *Psycho-Cognitive Aspects of Dynamic Model-Building in Logo: A simple Population Evolution and Predator/Prey Program*, Journal for Educational Computing Research, *4(3)*.

APPENDICES

APPENDICE 1

LE MODÈLE DE LOTKA VOLTERRA

Utilisons l'exemple type lièvres-lynx. On suppose que les lièvres ont de la nourriture en abondance et sans limite et que les lynx vivent exclusivement des lièvres.

Le modèle de Lotka-Volterra peut se déduire directement du diagramme causal de la figure 3', avec ses quatre relations.

Relation 1 et ses équations

Les lièvres (**l**) laissés à eux-mêmes voient leur population augmenter à un taux constant de façon telle qu'ils connaissent une croissance exponentielle. Soit **l**(t) le nombre de lièvres au temps t, alors on a:

$l'(t) = k_1 \times l(t)$	où $k_1 \geq 0$	[équation 1a]
$l(t+\Delta t) - l(t) = k_1 \times l(t) \times \Delta t$	où $k_1 \geq 0$	[équation 1b]

Relation 2 et ses équations

Les lynx (**L**) laissés à eux-mêmes voient leur population décroître à un taux constant (décroissance exponentielle) jusqu'à leur disparition n'ayant plus rien pouvant assurer leur subsistance. Soit **L**(t) le nombre de lynx au temps t, on a alors:

$L'(t) = -k_2 \times L(t)$	où $k_2 \geq 0$	[équation 2a]
$L(t+\Delta t) - L(t) = -k_2 \times L(t) \times \Delta t$	où $k_2 \geq 0$	[équation 2b]

Les relations 1 et 2 sont traduites par deux équations selon qu'on considère un accroissement continu ou discret. La première est une équation différentielle et la seconde son correspondant en différences finies.

Si les populations sont laissées à elles-mêmes, on a, dans les deux cas, une fonction exponentielle. Les équations qui suivent décrivent les conséquences de les jumeler. Les relations 3 et 4 expriment la relation proies-prédateurs.

Relation proies-prédateurs et les équations correspondantes

Les deux populations agissent l'une sur l'autre de telle sorte que le taux de croissance normale des lièvres décroît (augmente) avec toute croissance (décroissance) dans la population de lynx (relation 3) et que le taux de croissance normale des lynx augmente (diminue) avec toute croissance (décroissance) dans la population des lièvres (relation 4). Les conséquences de cette relation proies-prédateurs peuvent se traduire numériquement par un facteur de rencontre des individus des deux populations. Lotka-Volterra utilise comme facteur de rencontre le produit des deux populations. Le taux de variation de chacune des populations, $I(t)$ et $L(t)$, doit donc être corrigé par un facteur $I(t) \times L(t)$, positif pour les lynx et négatif pour les lièvres. Les équations 1a, 1b et 2a, 2b deviennent donc respectivement, avec $k_3 \geq 0$ et $k_4 \geq 0$:

$$I'(t) = k_1 \times I(t) - k_3 \times I(t) \times L(t) \quad \text{[équation 1a']}$$

$$I(t+\Delta t) - I(t) = k_1 \times I(t) \times \Delta t - k_3 \times I(t) \times L(t) \times \Delta t \quad \text{[équation 1b']}$$

$$L'(t) = -k_2 \times L(t) + k_4 \times I(t) \times L(t) \quad \text{[équation 2a']}$$

$$L(t+\Delta t) - L(t) = -k_2 \times L(t) \times \Delta t + k_4 \times I(t) \times L(t) \times \Delta t \quad \text{[équation 2b']}$$

APPENDICE 2

MODULE DE PRÉSENTATION DU DIAGRAMME DE PHASE

Séance de présentation
de la situation économique:
Courbes de profit

Steeve Lemay
Claudine Mary
Claude Janvier
Madeleine Landry

Mars 1989

SÉANCE DE PRÉSENTATION DU DIAGRAMME DE PHASE: SITUATION ÉCONOMIQUE

Objectif général

L'objectif est de familiariser les élèves avec des graphiques ayant les caractéristiques du diagramme qui sera utilisé pour introduire la situation «proies-prédateurs» du jeu.

La présentation de tels graphiques pour deux situations différentes, une économique et l'autre écologique, devrait permettre une meilleure appropriation de ce type de graphique comme outil d'exploration.

Caractéristiques communes aux graphiques des deux situations

- Les graphiques présentent des courbes de niveau.
- On peut passer d'une courbe à l'autre en modifiant l'une des deux variables d'abscisse et d'ordonnée, ou les deux.
- Une action sur une variable entraîne une action sur l'autre.
- Tout l'espace graphique a un sens.
- Des parcours dans l'espace graphique peuvent être tracés et lus selon une variable temps.

La situation économique: les courbes de profit

Les graphiques étudiés (voir annexe 1) présentent les courbes de profit de trois stations-services: les stations **G** (pour grosse ou «Grosso»), **M** (pour moyenne ou «Media») et **I** (pour indépendante ou «Jos ind.»).

En abscisse, on trouve la quantité d'essence vendue ($\mathbf{Q} \times 10^3$) et en ordonnée, le prix de vente du litre (**PV**). Le profit est calculé grossièrement selon la formule suivante:

$PV \times Q \times 10^3$ - prix à l'achat de $Q \times 10^3$ - frais d'administration = profit

Pour chaque ensemble de couples ($Q \times 10^3$; **PV**) qui donnent un même profit, une courbe est déterminée: courbe de profit 0$, courbe de profit 1000$, etc.

Il faut noter que la situation économique étudiée présente deux présupposés:

1. Ce qui est vendu correspond à ce qui est acheté.
2. Le système d'achat fonctionne sur une base de 2 semaines.

Plan de la séance selon des objectifs de lecture et d'interprétation des graphiques:

1. Lecture et déplacement d'un point dans le plan cartésien: (**Q** x 10^3 ; **PV**).

2. Lecture et interprétation d'une courbe de profit: sur une même courbe le profit est toujours le même et un profit différent détermine une courbe différente.

3. Passage d'une courbe à l'autre à partir d'un point donné en modifiant la variable **PV**, la variable **Q** ou les deux.

4. Traçage et lecture d'un parcours dans le plan cartésien; parcours où les états différents correspondent à des temps différents de l'évolution d'une situation.

Matériel nécessaire: annexe 3

Niveau: Sec. III et V

Écoles: Collège Stanislas, classe de seconde (9 mars 1989)
Polyvalente Pierre-Dupuy, secondaire III (25 avril 1989)

Durée: 50 min.

DÉROULEMENT DE LA SÉANCE DE PRÉSENTATION DU DIAGRAMME DE PHASE, SITUATION ÉCONIMIQUE

Présentation de la situation

On distribue aux élèves le graphique «courbe de profit 0 - Station G» (voir annexe 1). Le graphique est aussi présenté sur acétate.

Il représente une courbe donnant un profit de 0$ pour une station-service. Autrement dit, lorsqu'on soustrait toutes les dépenses du propriétaire au revenu brut qu'il a amassé, pour tous les points situés sur cette courbe, on obtient un profit de 0$.

Si on observe les axes du graphique, alors on remarque que l'axe des données (vertical) exprime le prix de vente pour 1 litre d'essence (PV), tandis que l'axe des abscisses (horizontal) exprime le nombre de litres vendus en **deux semaines** par la station-service ($Q \times 10^3$).

1. Lecture et déplacement d'un point dans le plan cartésien

Présentation des axes*

Le présentateur place un point A (10000; 0,45$)

Questions:

- Si je me situe au point A, est-ce que mon prix de vente est élevé? Qu'en est-il de ma quantité vendue en litres?
- Si je désire avoir un prix de vente bas et une quantité vendue élevée, à quel endroit pourrais-je situer mon point A?
- Si à partir de mon point A, je trace une droite perpendiculaire à l'axe vertical, qu'est-ce que je vais obtenir comme lecture? Et si je trace une droite perpendiculaire à l'axe horizontal?
- Et si le point A se déplace verticalement vers le haut, que se passe-t-il avec mon PV? Et si le déplacement se fait horizontalement?

* Cette partie à été raccourcie.

2. Lecture et interprétation d'une courbe de profit

a) Station G - courbe de profit 0

Formule: **Profit = revenus – dépenses**

Les revenus se calculent de la façon suivante: **PV x ($Q \times 10^3$)**

Les dépenses tiennent compte des frais d'administration (salaire des employés, entretien, location du local, etc.) et du prix de l'essence à l'achat. Pour la station G les frais d'administration sont de 1000$. Le prix coûtant du litre (PC) variable est donné dans le tableau ci-dessous.

Nombre de litres vendus $Q \times 10^3$	Prix coûtant du litre PC
les 3000 premiers	0,47$
les 2000 suivants	0,45$
les autres	0,43$

Le coût de l'essence à l'achat se calcule donc de façons différentes selon l'intervalle considéré:

si $Q \leq 30$, elles sont de

$$(Q \times 10^3) \times 0{,}47$$

si $30 < Q \leq 50$, elles sont de

$$30 \times 10^3 \times 0{,}47 + (Q - 30) \times 10^3 \times 0{,}45$$

et si $Q > 50$, elles sont de

$$30 \times 10^3 \times 0{,}47 + 20 \times 10^3 \times 0{,}45 + (Q - 50) \times 10^3 \times 0{,}43$$

On présente aux élèves seulement la formule grossière suivante:

Profit = quantité vendue x PV – coût à l'achat de la quantité vendue – 1000 = 0

b) Calcul de 3 points sur la courbe de profit 0*

A (1000 ; 0,57)
B (40000 ; 0,49)
C (65000 ; 0,47)

Les calculs du profit pour A et B sont faits par le présentateur.
Le calcul du profit pour C est laissé aux élèves

Ex.: Au point A, quel est le prix de vente du garage G ? PV = 0,57$

Quel est la quantité vendue par le garage G ? Qtés = 10 000 litres

Quel est le prix coûtant de l'essence pour le propriétaire lorsqu'il vend 10 000 litres ?
Prix coûtant = 0,47$

On vérifie qu'on a bien un profit de 0$
10000 litres x 0,57$/litre - 10000 litres x 0,47$/litre – 1000$ = 0$

Ex.: Au point B, quel est le prix de vente du garage G ? PV = 0,49$

Quelle est la quantité vendue par le garage ? Qtés = 40 000 litres

Quel est le prix coûtant de l'essence pour le propriétaire lorsqu'il vend 40 000 litres ?
Prix coûtant = 30 000 • 0,47$ + 10 000 • 0,45$
= 18 600

Et on vérifie qu'on a bien un profit de 0$:
40 000 • 0,49$ - 18,600 - 1000$ = 0$

Ex.: Au point C, quel est le prix de vente du garage ? PV = 0,47$

Quelle est la quantité vendue par le garage ? Qtés = 65 000 litres

Quel est le prix coûtant de l'essence pour le propriétaire lorsqu'il vend 65 000 litres?
30 000 • 0,47$ + 20 000 • 0,45$ + 15 000 • 0,43$ = 29 550

Encore ici on trouve un profit de 0$
65 000 • 0,47$ - 29 550 - 1000$ = 0$

* À Pierre-Dupuy, les calculs ont été effectués pour A et B seulement.

c) Compréhension de la courbe*

Questions:

- Si la station-service vend son essence à 0,57$ / litre et en vend 10 000 litres, alors le propriétaire fera un profit nul. Advenant que le propriétaire baisse son prix de vente à 0,55 / litre, que doit-il advenir du nombre de litres vendus pour que le propriétaire conserve son profit ?

- Maintenant, rendu à ce point, si le propriétaire décide une fois de plus de diminuer son prix de vente à 0,53$ / litre, que doit-il advenir du nombre de litres vendus pour que le propriétaire conserve son profit ?

- Et finalement, si le propriétaire décide encore une fois de diminuer son prix de vente à 0,51$ / litre, que doit-il advenir du nombre de litres vendus pour que le propriétaire conserve son profit ?

Question:

Suite à ce que nous venons de voir, pouvons-nous dire qu'une même diminution du prix de vente entraîne une même augmentation du nombre de litres vendus? (Si on veut conserver un profit nul.)

Réponse: Non, car à un certain PV donné, pour conserver un profit nul, le proprio devra récupérer beaucoup de clientèle.

d) Calculer le profit pour 3 autres points (sur la courbe de profit 1 000$)

Il s'agit de trouver les points sur le graphique qui permettra au propriétaire de la station-service d'obtenir un profit de 1 000$ (i.e. de trouver un prix de vente et une quantité de litres vendus de façon à obtenir un profit de 1 000$).

Donc si le propriétaire veut un profit de 1 000$, nous aurons la relation suivante:

Quantité vendue x PV - coût à l'achat de la quantité vendue - FA = 1000$

Si on fixe une quantité vendue, nous obtiendrons une équation avec une seule inconnue (PV), car avec une quantité donnée, on connaît aussi le prix coûtant.

Si le garage vend 30 000 litres d'essence en deux semaines, alors son prix coûtant sera de 0,47$ / litre.

* Au Collège Stanislas, cette partie n'a pas été faite: la lampe du rétroprojecteur ayant brûlée, elle n'était pas facile à réaliser.

On retrouve l'équation suivante:

30 000 litres x PV - 30 000 litres x 0,47$/litre - 1000$ = 1000$

En isolant PV on obtient: PV = 0,536 / litre

Ainsi pour = 0,54$ / litre avec une quantité vendue de 30 000 litres, le propriétaire fera 1 000$ de profit.

Questions:

- Maintenant, si le propriétaire de la station G vend pour 15 000 litres d'essence en 2 semaines, quel devra être son prix de vente pour qu'il obtienne 1000$ de profit ?* PV = 0,60

- Si le propriétaire de la station G vend pour 40 000 litres d'essence en 2 semaines, quel devra être son prix de vente pour qu'il obtienne 1000$ de profit ? * PV = 0,52

En réunissant les points, on retrouve la courbe nous donnant tous les couples (Q, PV) permettant d'obtenir un profit de 1000$.

Le présentateur rabat sur l'acétate ‹courbe de profit 0› toutes les autres courbes de profit de la station Grosso (voir annexe 1: courbes de profit-station G) et spécifie qu'il serait possible de vérifier des points pour toutes les autres courbes.

e) Lecture de points (PV, Q, Profit):

Sans déplacement

Questions (travail à partir de l'acétate):

- Si la station G a vendu 30 000 litres d'essence en 2 semaines et obtient un profit de 2000$, quel était le prix de vente de son essence pendant ces 2 semaines? PV=0,57$

- Si elle a vendu son essence 0,52$ / litre pendant 2 semaines et a obtenu un profit de 3000$, combien a-t-il vendu de litres durant ces 2 semaines? Q = 65 000 litres

- Si le garage a vendu 30 000 litres à 0,64$ / litre pendant 2 semaines, quel était le profit obtenu par le garagiste? Profit = 4 000$

* Cette question n'a pas été posée: le présentateur a simplement mentionné qu'on pourrait de la même façon effectuer des calculs qui donneraient d'autres points sur la courbe de 1000$ de profit. Les autres courbes de profit ont été tout de suite rabattues sur la première acétate.

3. Passage d'une courbe à l'autre: déplacement

Questions (travail à partir de l'acétate):

Soit la situation suivante:

En vendant 20 000 litres à 0,52$ / litre, le propriétaire de la station G obtient un profit nul. Comment le propriétaire pourrait-il obtenir un profit de 1000$?

- Si la quantité vendue demeure stable, mais que le propriétaire obtient un profit de 1000$, que s'est-il produit? **PV** a augmenté.

- Si le prix de vente demeure stable, mais que le propriétaire obtient un profit de 1000$, que s'est-il produit? **Q** a augmenté.

- Est-il possible d'obtenir un profit de 1000$ en augmentant le prix de vente et la quantité vendue? Oui

- Est-il possible maintenant de diminuer la quantité vendue et tout de même faire un profit de 1000$? Oui mais alors, on a une augmentation très élevée du **PV**.

- Est-il possible maintenant de diminuer le prix de vente et tout de même réaliser un profit de 1000$? Oui mais on a alors une augmentation de très élevée de **Q**.

4. Traçage et lecture d'un parcours dans le plan cartésien

La situation est présentée dans les termes et dans l'ordre qui suivent:

Une municipalité est desservie par trois stations-services.

Les graphiques des trois stations avec leurs courbes de profit sont présentées sur rétroprojecteur avec en informations supplémentaires, le prix coûtant du litre (prix auquel la station achète son essence) et les frais d'administration que la station doit considérer dans ses dépenses (voir courbes G, M et I_1, en annexe 1).

On étudiera l'évolution des prix (**PV**) et des ventes (**Q** x 10^3) des trois stations durant une période de 10 semaines:

Sur chaque acétate est placé un point correspondant à la situation initiale des trois stations au début de la période de 10 semaines: G (0,52 ; 40000), M (0,53 ; 30000), I (0,52 ; 30000).

Durant cette période, on enregistre des changements dans le prix de vente et la quantité d'essence vendue. Le premier changement est effectué par la station **I** qui réussit à acheter son essence à meilleur prix. Les courbes de profit de la station **I** se trouvent modifiées et sa position, en termes de profit, meilleure (à supposer qu'elle maintienne son prix de vente et que la quantité d'essence qu'elle vend ne s'en trouve pas modifiée).

Les nouvelles courbes de profit de la station **I** son présentées au rétroprojecteur (courbes I_2, en annexe 1). On évalue alors la position initiale de la station **I** selon ces nouvelles courbes de profit (I_2) et en comparaison avec les anciennes courbes de profit (I_1: **I** est plus près de la courbe de 1000$ de profit). (Superposition des courbes I_1 et I_2).

Mais **I** décide de baisser son prix de vente: les autres réagiront.

On distribue aux élèves les graphiques G, M et I_2 et le tableau qui suit.

Station d'essence

	G		I		M	
Semaine	**Q**	**P.V.**	**Q**	**P.V.**	**Q**	**P.V.**
0	40	0,52	30	0,52	30	0,53
2	35	0,52	45	0,51	20	0,53
4	45	0,50	42	0,50	23	0,51
6	47	0,48	48	0,49	15	0,50
8	51	0,48	54	0,49	5	0,50
10	45	0,51	45	0,52	**FAILLITE**	

Le tableau est présenté sur acétate.

La première ligne du tableau donne la situation initiale telle qu'elle est donnée sur les graphiques. Les autres lignes donnent les changements enregistrés par période de deux semaines: **PV** est fixé au début de la période et **Q** est enregistré à la fin de la période.

Le premier mouvement est donc effectué par **I** qui baisse son **PV** de **0,01$** ce qui fait augmenter sa quantité d'essence vendue. **M** réagit: elle baisse son **PV** de **0,02$**. Il s'enclenche une guerre des prix: **I** vendra son essence toujours **0,01$** moins cher que **M**. **G** comprendra et suivra **I** ce qui mènera **M** à la faillite.

Le **PV** de I sur la deuxième ligne du tableau est encerclé sur l'acétate, puis le PV de M sur la troisième ligne afin de marquer qui des trois stations amorce le changement.

Les élèves ont ensuite comme tâche de tracer le parcours correspondant à l'évolution des **PV** et **Q** à travers les 10 semaines ce, pour chacune des stations.

La présentatrice exécute sur l'acétate le tracé du premier changement survenu pour G à titre d'exemple. Au besoin, un deuxième tracé est effectué: le premier mouvement survenu pour M.

Lorsque la tâche est presque achevée (selon le temps disponible), quelques questions sont posées*: Qui sort gagnant de cette guerre? Qui en sort perdant? Quel est le sort de G? Quelle est la situation actuelle de chacune des stations par rapport à leur situation initiale? (Des évaluations sont à faire par les élèves quant aux profits plus ou moins grands positifs ou négatifs et quant aux risques pris par **G** p.e. à la 6e semaine.)

En annexe 2 sont donnés les parcours que les élèves devaient tracer.

* •Au Collège Stanislas, les élèves étaient pris par la tâche de tracer le parcours: l'étude des parcours n'a pas été approfondie.
•À Pierre-Dupuy, la tâche a été raccourcie faute de temps.

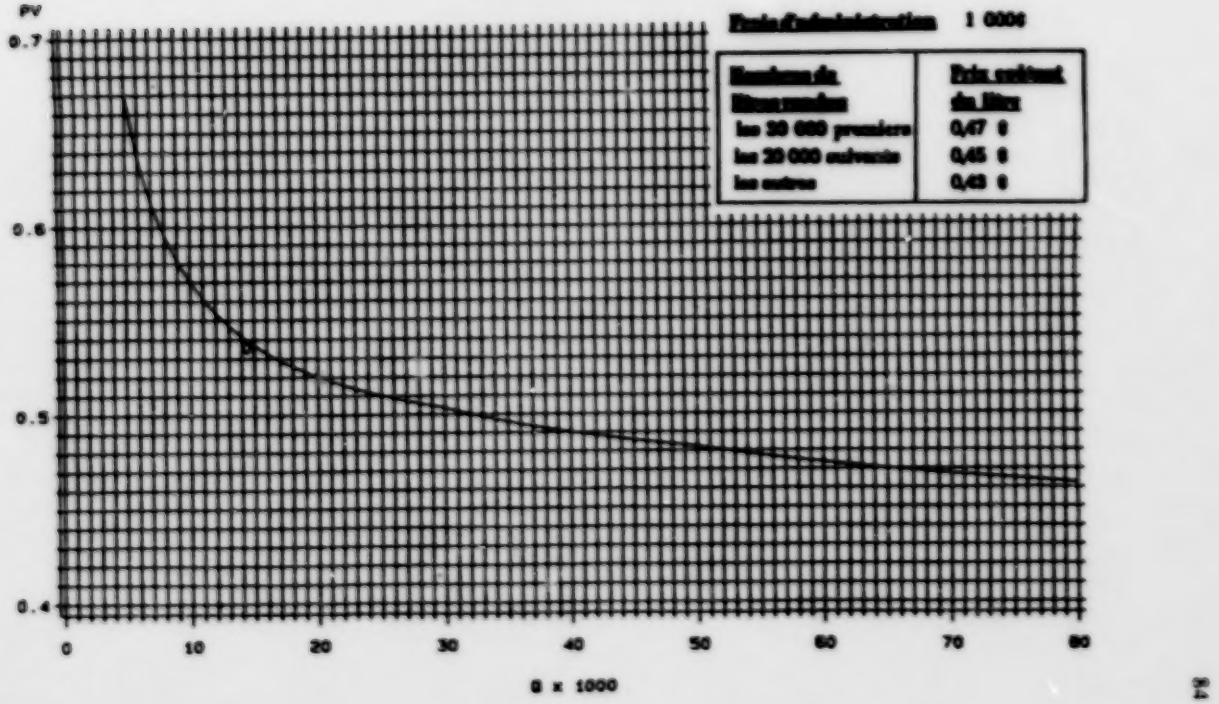
ANNEXE 1: GRAPHIQUES

- Courbe de profit 0 - station **G**
- Courbes de profit - station **G**
- Courbes de profit - station **I** (I_1)
- Courbes de profit - station **I** avec prix coûtant 2 (I_2)
- Courbes de profit - station **M**
- Courbes de profit - station **G**, station **M** et station **I** (I_2) avec positions initiales

COURBE DE PROFIT O

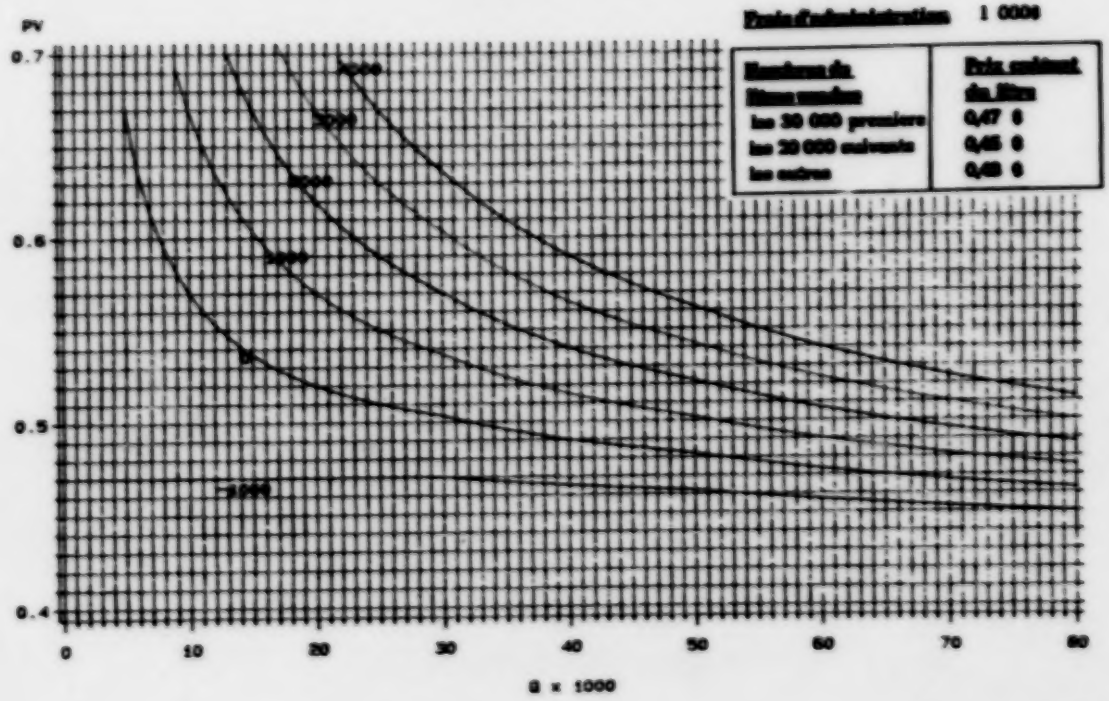
P=REVENUS-DEPENSES

Station G



COURBES DE PROFIT

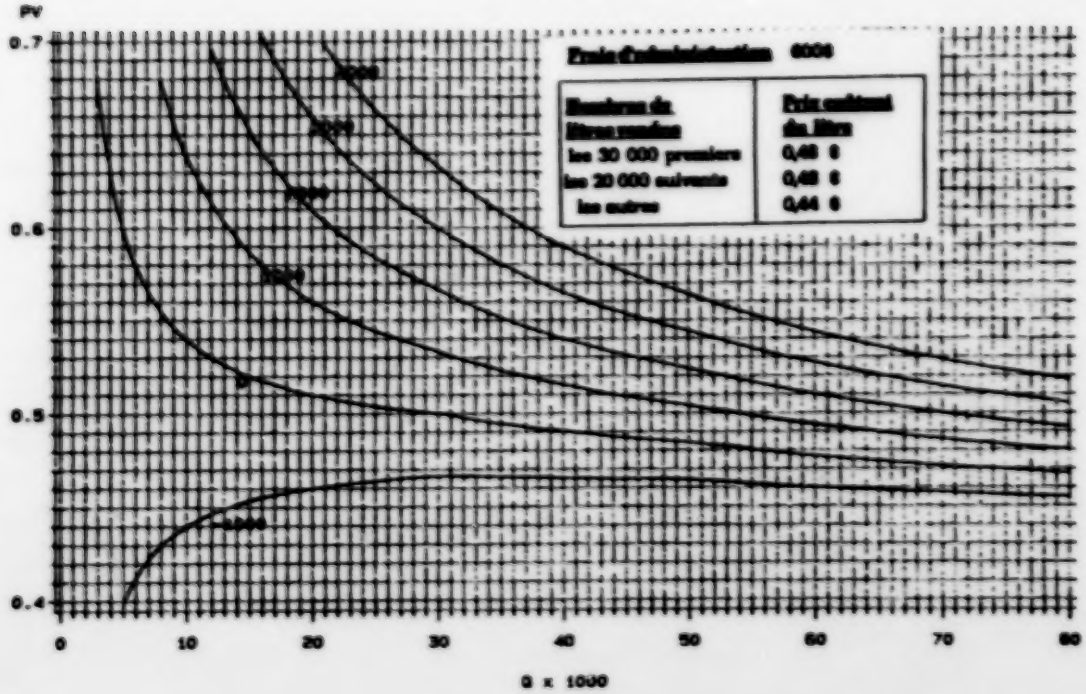
Station G



I_1

COURBES DE PROFIT

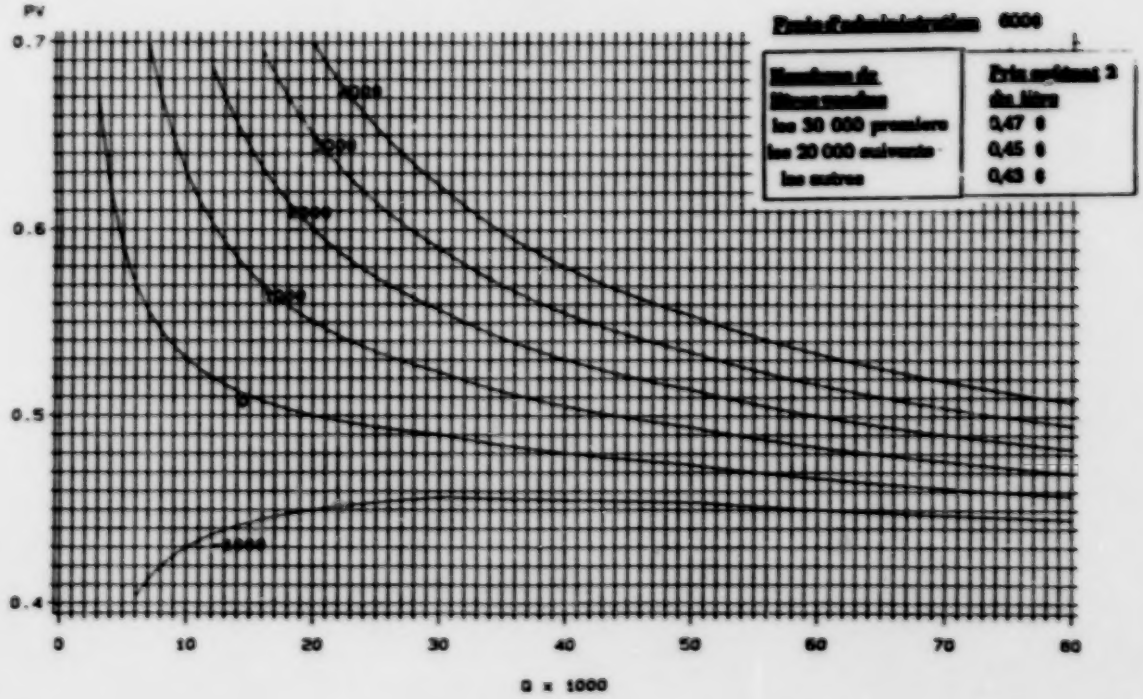
Station I



I_2

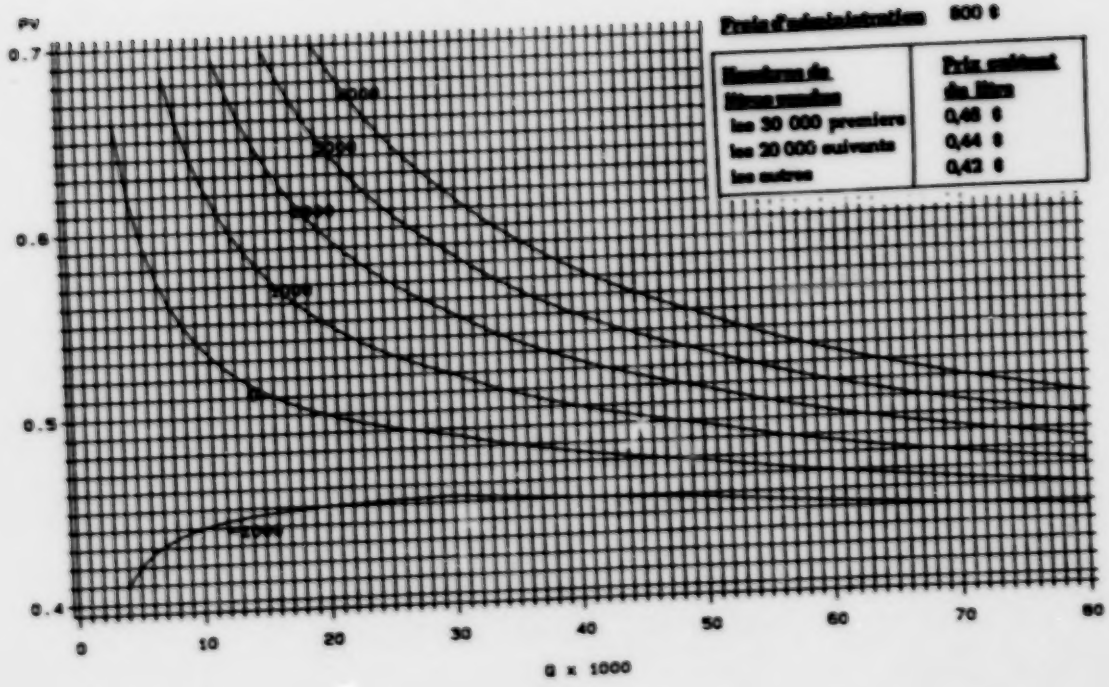
COURBES DE PROFIT

Station I

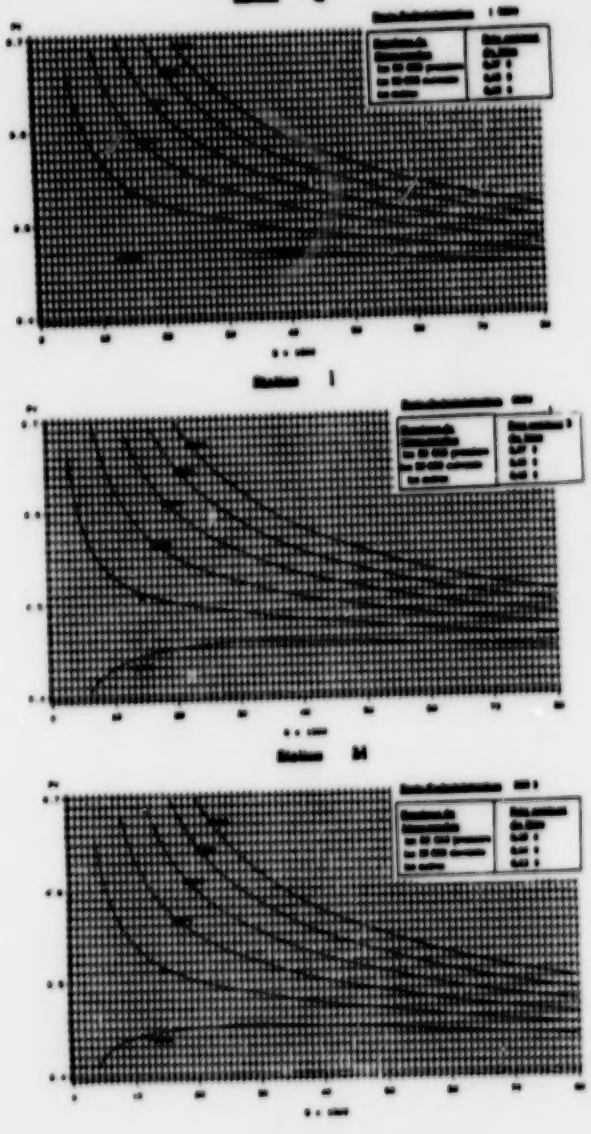


COURBES DE PROFIT

Station M

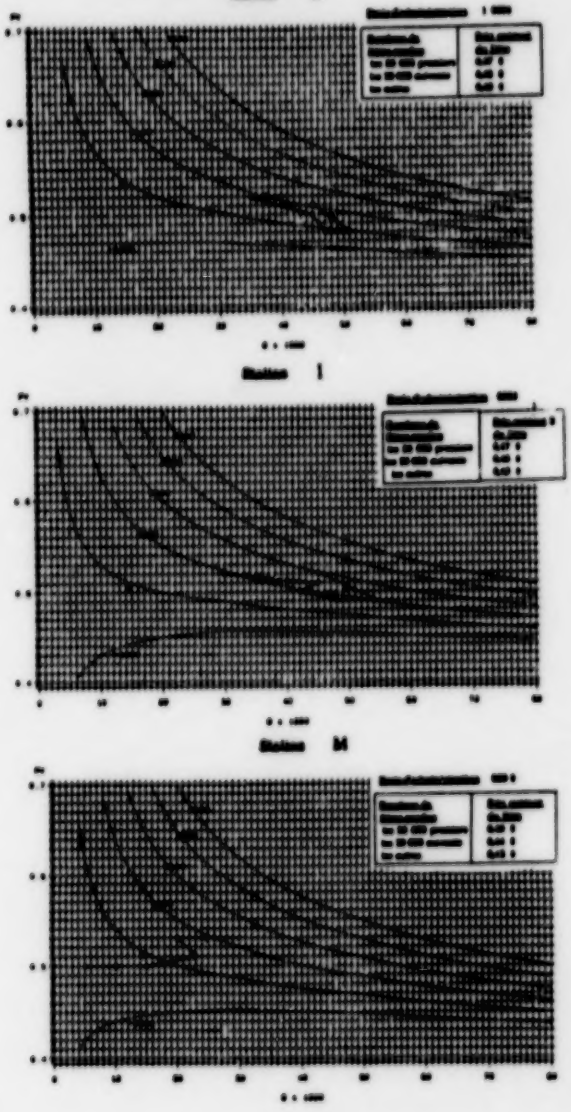


COURBES DE PROFIT



ANNEXE 2: PARCOURS

COURBES DE PROFIT



ANNEXE 3: DESCRIPTION DU MATÉRIEL UTILISÉ

Professeur

Acétate 1
- Courbe de profit 0 - station G, avec formule du profit et informations sur le prix coûtant (PC) et les frais d'administration (FA)
- Rabat: l'ensemble des courbes de profit - station G

Acétate 2 • Calcul des trois points sur la courbe de profit 0 - station G

Acétate 3 • Calcul des deux points sur la courbe de profit 1000 - station G

Acétate 4
- Courbes de profit - station I avec informations nécessaires (PC et FA): I_1
- Courbes de profit - station I avec prix coûtant 2: I_2

Acétate 5 • Courbes de profit - station G avec informations nécessaires (PC et FA)

Acétate 6 • Courbes de profit - station M avec informations nécessaires (PC et FA)

Acétate 7 • Tableau d'évolution des stations au cours de 10 semaines

Acétate 8 • Parcours de G

Acétate 9 • Parcours de I_2

Acétate 10 • Parcours de M

Étudiants:

1. Courbe de profit 0 - station G (feuille 8 1/2 X 7)
2. Courbes de profit - station G (feuille 8 1/2 X 7)
3. Courbes de profit G, M et I_2 avec position initiale (feuille 8 1/2 X 14)
4. Tableau d'évolution des stations au cours de 10 semaines (feuille 8 1/2 X 7)

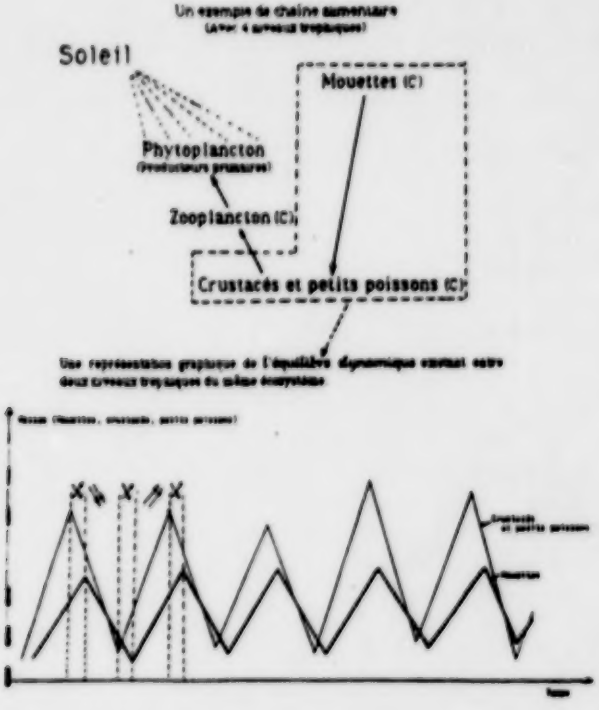
APPENDICE 3

SÉANCE DE PRÉSENTATION DU CONTEXTE ÉCOLOGIQUE EN SECONDAIRE V

Première partie: groupe témoin

Le contexte écologique est présenté approximativement dans les termes suivants.

La nature présente plusieurs écosystèmes dans lesquels vivent une pyramide proie-prédateur. On peut prendre l'exemple proposé par le manuel.



Dans ce diagramme "→" signifie **est un «prédateur pour».**

Éléments importants: on constate que les prédateurs dépendent à peu près totalement des proies pour leur croissance et leur survie.

Si on considère le système réduit «mouettes, crustacés et petits poissons», il faut supposer que les mouettes dépendent des petits poissons et crustacés pour leur survie alors que ceux-ci ont l'alimentation qu'il leur faut.

Bien que les écosystèmes à plusieurs étages comme celui-ci soient présentés de manière statique, il n'en demeure pas moins que chacune des populations impliquées peut être considérée variable. En réalité, un modèle dynamique est beaucoup plus approprié car rien ne nous assure que chacune des populations de par les lois même de la croissance ne soit pas continuellement fluctuante. Tout le système peut donc être imaginé comme étant continuellement en changement que l'on peut décrire par les relations suivantes (de nature causale).

Relations causales (normalement fournies par le diagramme causal qui ne sera pas présenté ici.)

À une **augmentation** du nombre de mouettes va correspondre une **diminution** du nombre des crustacés et des petits poissons.
À une **diminution** du nombre des mouettes va correspondre une **augmentation** du nombre de poissons et des crustacés.

On a des variations dans le sens opposé.

À une **augmentation** du nombre de poissons et des crustacés va correspondre une **augmentation** du nombre de mouettes.
À une **diminution** du nombre de poissons et des crustacés va correspondre une **diminution** du nombre des mouettes.

On a des variations dans le même sens.

Mais en examinant plus attentivement ces relations causales, on peut formuler leur conséquences sur la fluctuation des populations.

Évolution des populations

Imaginons que l'on a un petit nombre de mouettes et un bon nombre de petits poissons et crustacés. Le nombre de mouettes est appelé à croître ce qui devrait entraîner une réduction du nombre de poissons et crustacés ou encore une réduction de leur croissance. Mais à partir d'un certain temps, les mouettes ne pourront plus se développer à

partir des poissons et crustacés rendus trop petits en nombre. On assistera donc alors à une décroissance des deux populations. Jusqu'à ce que les poissons et crustacés récupèrent. À partir du moment où les mouettes deviennent peu nombreuses, les poissons commenceront donc à croître et ceci entraînera un ralentissement de la décroissance des mouettes qui bientôt recommenceront à croître. On a donc un cycle de croissance et de décroissance pour les deux populations. (C'est ce que montre l'évolution des populations fournie par le graphique multi-courbes présenté précédemment.)

[Le présentateur en profite ici pour parler de la conséquence de perturbations naturelles.]

Première partie: groupe expérimental

La présentation est la même que pour le groupe témoin, sauf qu'à la fin on reprend le raisonnement précédent sur le diagramme de phase. Plus précisément, on décrit l'évolution des populations telle que la fournit le diagramme de phase. On introduit ici l'idée de l'existence de plusieurs cycles avec celle des conséquences de perturbations naturelles.

Deuxième partie (l'écosystème de la pisciculture - l'entreprise): **groupe témoin**

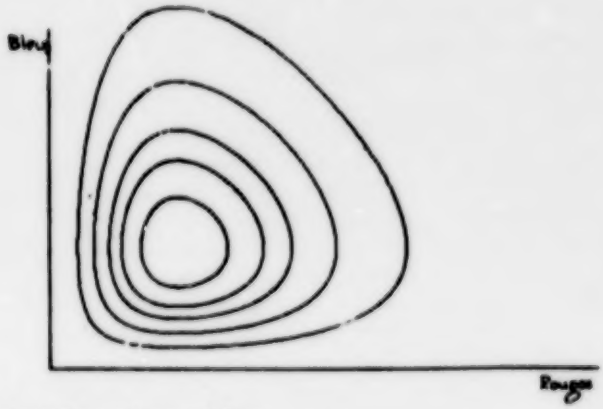
Dans le didacticiel sur lequel les élèves s'exécuteront, les prédateurs sont des poissons rouges et les proies des poissons bleus.

Le présentateur (responsable du projet) demande: Comment varient les deux populations? On suppose que les rouges dépendent des bleus et que les bleus peuvent trouver de la nourriture dans le lac (le rectangle violet).

Avant la présentation véritable du jeu, le présentateur précise: Dans le cas présent, vous pourrez intervenir pour modifier l'évolution des populations. Vous pourrez pêcher les rouges et les vendre. Vous pourrez ensemencer le lac de poissons bleus pour nourrir les rouges et aussi des poissons rouges.

Deuxième partie (l'écosystème de la pisciculture): **groupe expérimental**

La présentation se fait de la même façon, sauf qu'avec ce groupe, la pêche et l'ensemencement sont illustrés sur le diagramme de phase. Chaque élève reçoit une série de courbes «concentriques» (ci-dessous) et



décrit un parcours à partir de consignes précises.

Troisième partie (le jeu sur ordinateur): identique pour **les deux groupes**

Le présentateur précise le but de l'expérimentation:

1. Étudier jusqu'où le logiciel permet aux étudiants de comprendre les caractéristiques du système.
2. Observer les stratégies qu'ils utilisent et leur évolution.
3. Faire explorer un système dans le but didactique de favoriser l'apprentissage de concepts généraux et complexes relativement aux systèmes.

Il sollicite la collaboration des élèves en indiquant que certains d'entre eux devront accepter d'être observés et pris sur vidéo.

Puis, devant l'écran d'un AMIGA, le jeu est présenté aux élèves, en indiquant les éléments suivants:

1. Commencement aléatoire. Cliquer sur **début**.
2. On remarque aussitôt: le mouvement des colonnes et le changement de couleur du bassin (le rectangle violet).
3. Le but du jeu: exploiter efficacement ce système qui est présenté comme étant une pisciculture.

4. Pour ce faire, on peut:
   - pêcher des rouges:
     - la pêche est proportionnelle:
       lac plein - beaucoup de rouges
       lac vide - peu de poissons
       (illustration par le présentateur)
     - on peut voir comment rapporte une pêche
     - chaque pêche prend du temps donc le chrono avance à chaque pêche de 3 secondes (montrer le saut de l'aiguille)
     - pour faciliter la pêche, le jeu s'arrête (s'immobilise)
   - semer des rouges ou des bleus:
     - cliquer: on voit les blocs de poissons se former; à la fin, le paquet tombe
     - votre encaisse est réduite d'autant
     - les prix sont marqués
     - attention: pas d'argent, plus d'action
5. Mises en garde
   - S'il y a trop de poissons: catastrophe écologique, alors il y a amende et possibilité de recommencer.
   - Vous pouvez vider le lac. Alors rien ne se produit, à vous d'agir.
6. Vous commencez avec une encaisse de 5 000$.

APPENDICE 4

QUESTIONS DE FIN D'EXPÉRIMENTATION EN SECONDAIRE III

Après la deuxième séance de jeu, aux deux groupes, ORD+ et DIAG:

1a) Est-ce que vous trouvez que ça allait mieux à la fin qu'au début? Vous êtes-vous améliorés?

1b) Pourquoi...?

2) Pouvez-vous me décrire comment vous jouer maintenant? Si vous deviez expliquer comment vous jouer à une autre groupe de secondaire III, qu'est-ce que vous diriez?

3) Expliquez ce qui se passe chez les poissons? (L'interviewer essaie d'amener les élèves à se référer au contexte.)

Après la deuxième séance de jeu, au groupe DIAG seulement:

4) Aimez-vous mieux jouer sur les colonnes ou sur le diagramme? Lequel est le plus facile

En fin d'expérimentation pour les groupes ORD+ et DIAG:

4 ou 5) Est-ce que vous vous trouvez bon dans le bonus (ou le jeu de la stabilité)? Comment faites-vous pour obtenir la stabilité?

Selon le temps:

5 ou 6) Pourrait-on atteindre la stabilité d'une autre façon? Pouvez-vous obtenir le bonus en semant des bleus? (Faire essayer) En semant des rouges? (Faire essayer).

APPENDICE 5a

STRATÉGIES (OU PATTERNS DE JEU) EN SECONDAIRE III

Les stratégies, ou patterns de jeu, sont établies à partir du jeu ordinaire sur colonnes. Le jeu diagramme n'a pas permis d'identifier d'autres stratégies pertinentes. Nous regroupons des stratégies «ou» patterns en trois classes qui déterminent en fait des niveaux de jeu. Les équipes du groupe ORD+ sont identifiées par O1, O2 et O3 et les équipes du groupe DIAG par D1, D2 et D3.

I- Stratégie primitive

a) Exploitation (ensemencement et pêche) inconsidérée des R

On pêche jusqu'à épuisement (pour faire de l'argent - c'est le but du jeu) puis on ensemence des R pour renflouer.

En sec. III, la moitié des équipes (D2, D3 et O1) démarrent avec une stratégie d'exploitation inconsidérée.. C'est beaucoup. Mais quelques remarques s'imposent:

-il faut noter qu'en sec. I et V, le coût des rouges est de 1000$ et celui des bleus, 100$. En sec. III, le coût des rouges est de 700$ et celui des bleus, 70$;
-des problèmes d'incompréhension dus à la langue parlée de plusieurs équipes de sec. III ont pu retarder l'appropriation du jeu;
-la présentation du jeu en sec. III s'est fait rapidement.

Cette stratégie mène à un cul-de-sac: d'une part, une pêche excessive mène à la catastrophe, d'autre part, l'ajout de rouges (+R) mène à des problèmes d'argent.

b) Intervention des B (+B) sans abandon de +R

Par nécessité souvent, parce que c'est tout ce qu'on peut faire:

-on ajoute des B: on n'a plus d'argent pour ajouter des R;
-on en ajoute de façon très prudente, «par peur de la catastrophe» à cause des bleus (il ne faut pas avoir trop de B).

Lorsqu'interviennent les bleus dans le jeu, leur rôle reste peu clair. On dira qu'ils nourrissent les rouges mais comment cela se répercute sur le système, il n'est pas sûr qu'on

s'en préoccupe dans un premier temps. Toutefois, il apparaît certain, que c'est la réflexion sur le rôle des bleus ou l'observation d'un effet positif sur les rouges d'ajouter des bleus qui permet le passage à une stratégie plus évoluée.

Extrait de protocole

O1. Je leur on découvre le rôle des bleus sans abandonner toutefois l'ajout des rouges.

«Ah! je viens de catcher le but du jeu. Faut tout le temps que tu mettes des bleus pour que les rouges puissent manger.»

II- Jeux prudents

Avec la stratégie fb, on voit apparaître une stratégie de pondération dans l'ajout des rouges (R) et des bleus (B) (D2: choix entre +nB, où n grand, et +kB+lR ou l et k petits, par peur de la catastrophe) ou de compensation du mouvement des colonnes, d'équilibration R-B (O1: «pour pas qu'il monte trop») ou de jeu autour de la stabilité (D3). Il s'agit de jeux prudents avec «laisser aller».

Extrait de protocole

D2. Dans les questions, après expérimentation, les deux coéquipiers, T et D, expliquent leur stratégie. Leur pattern de jeu est de pêcher quand il y a beaucoup de rouges (R) de rajouter des R après la pêche, puis des bleus lentement pour faire monter les R. C'est le pattern qu'il fixe au début de la 2e séance d'observation et qu'il maintiens jusqu'à la fin. A la première séance leur stratégie etait de type 1a (exploitation inconsidérée des R).

I (interviewer)

I: *Maintenant, quand on veut pêcher et faire beaucoup d'argent, on est il mieux de pêcher quand il y a beaucoup de poissons ou pas beaucoup de poissons dans le lac?*

T: *Beaucoup de poissons*

I: *Donc, comment je peux faire pour faire monter les poissons dans ma colonne pour en avoir le plus possible?*

T: *Jeter les bleus lentement.*

I: *Pourquoi?*

T: *Ben parce que les rouges ont besoin des bleus pour ... c'est comme leur nourriture pis ce ... je jette des bleus. Mais si il y a trop de bleus, on ajoute un peu de rouges aussi, pas trop.*

s'en préoccupe dans un premier temps. Toutefois, il apparaît certain, que c'est la réflexion sur le rôle des bleus ou l'observation d'un effet positif sur les rouges d'ajouter des bleus qui permet le passage à une stratégie plus évoluée.

Extrait de protocole

O1, 3e jeu: on découvre le rôle des bleus sans abandonner toutefois l'ajout des rouges,

«Ah! je viens de catcher le but du jeu. Faut tout le temps que tu mettes des bleus pour que les rouges puissent manger.»

II- Jeux prudents

Avec la stratégie Ib, on voit apparaître une stratégie de pondération dans l'ajout des rouges (R) et des bleus (B) (**D2**: choix entre +nB, où n grand, et +kB+lR où l et k petits, par peur de la catastrophe) ou de compensation du mouvement des colonnes, d'équilibration R-B (**O1**: «pour pas qu'i monte trop») ou de jeu autour de la stabilité (**D3**). Il s'agit de **jeux prudents** avec «laisser aller».

Extrait de protocole

D2: Dans les questions, après expérimentation, les deux coéquipières, T et D, expliquent leur stratégie. Leur pattern de jeu est de pêcher quand il y a beaucoup de rouges (R) de rajouter des R après la pêche, puis des bleus lentement pour faire monter les R. C'est le pattern qu'il fixe au début de la 2e séance d'observation et qu'il maintienne jusqu'à la fin. À la première séance leur stratégie était de type Ia (exploitation inconsidérée des R).

I (interviewer)

I: *Maintenant, quand on veut pêcher et faire beaucoup d'argent, on est ti mieux de pêcher quand il y a beaucoup de poissons ou pas beaucoup de poissons dans le lac?*

T: *Beaucoup de poissons.*

I: *Donc, comment je peux faire pour faire monter les poissons dans ma colonne pour en avoir le plus possible?*

T: *Jeter les bleus lentement.*

I: *Pourquoi?*

T: *Ben parce que les rouges ont besoin des bleus pour... c'est comme leur nourriture pis ce... je jette des bleus. Mais si il y a trop de bleus, on ajoute un peu de rouges aussi, pas trop.*

I: *Pourquoi, faut-il que tu ajoutes des rouges à ce moment-là?*
T: *Parce que quand on jette des bleus, y a des rouges de plus en plus...*
D: *On mange des bleus parce que ça donne plus de poissons rouges parce que quand ils mangent des bleus, ça donne des enfants.*
T: *Ben parce que quand on jette, après on pêche. À chaque fois qu'on pêche, ben les rouges ils diminuent, ça fait qu'on jette des rouges.*

I: *Est-ce que tu jettes des rouges quand tu viens de pêcher des rouges?*
T: *Ouais!*

I: *Pourquoi?*
T: *Ben parce que peut-être y a trop de bleus.*

I: *Donc, qu'est-ce qui peut arriver s'il y a trop de bleus pis pas assez de rouges?*
T: *Ben, ça finit.*
D: *Non, mais ça donne pas beaucoup de chances d'encaisser.*

I: *Donc, les trucs pour faire monter les rouges d'après vous c'est...*
T: *Jeter des bleus pour que les rouges puissent manger. Jeter un peu de rouges pis un peu plus de bleus.*

I: *Mais, à chaque fois que vous jeter des rouges, vous savez que ça coûte très cher!*
T: *Ouais! mais on en jette juste un peu.*
D: *Parce que si on ajoute trop de bleus, on peut avoir une catastrophe.*
T: *Le mieux qu'on fait, c'est de pas toucher aux rouges. Juste toucher un peu aux bleus, c'est tout et laisser avancer tout seul* [14].

Extrait de protocole

O1: Les deux coéquipiers, U et G, expliquent leur stratégie suite à une question posée en fin d'expérimentation. Cette équipe a commencé le jeu avec une stratégie de type Ia pour aboutir à une stratégie de type «faire monter les R en ajoutant des B si ça ne monte pas tout seul». L'idée de stabiliser ou de compenser le mouvement des colonnes apparaît au moment du changement de stratégie, lors du passage d'une stratégie primitive à une stratégie plus évoluée après avoir trouver le «truc» de faire manger les R.

U: *Faut que tu pêches. Faut que tu stabilises ton rouge par rapport à ton bleu pis ton bleu par rapport à ton rouge pour pas qu'y montent trop. Pis si le bleu monte ben tu*

[14] Cette stratégie n'est pas utilisé lors des jeux.

vois le rouge qui monte parce que le rouge mange le bleu. Si le bleu descend, ben là tu mets du bleu pour nourrir le rouge. Pis la ben si t'as du rouge, tu peux pêcher pis tu fais de l'argent.

E: *Parce que vu que le rouge mange le bleu ben faut tout le temps qu'y ait plus de bleu pour que le rouge puisse manger plus pis que tu fasses plus d'argent.*

Dans le passage d'une stratégie primitive à une stratégie plus évoluée, cette stratégie «prudente» est vraisemblablement liée à la peur de la catastrophe. Et même si on s'écarte d'un jeu prudent pour jouer de façon plus dangereuse, l'idée de pondérer, compenser, balancer, stabiliser ou équilibrer le mouvement des colonnes est déterminante dans les stratégies subséquentes plus évoluées. Dans l'explication des stratégies de jeu, par les joueurs, on maintiendra jusqu'à la fin cette idée. Il nous semble que les tentatives de baser les actions sur les mouvements des colonnes sont le fruit en grande partie, d'un raisonnement sur les catastrophes: d'où l'importance de ces «catastrophes» dans le jeu.

Extrait de protocole

D1: À la fin, lors de questions de l'observateur, cette équipe qui a réalisé le meilleur score, avec un jeu à la limite de la catastrophe, parle toujours «d'équilibrer les deux». Toutefois le son sur la bande vidéo est très mauvais et l'information est partielle.

«... équilibrer les deux. Faut pas mettre trop haut pour que... Pêcher pas moins que 200$ les rouges. Après, il faut augmenter les bleus.»

III- Jeux plus évolués: abandon de +R avec pêche au max des R

L'abandon de +R et la pêche au max des R arrivent au moment d'une réflexion sur le mouvement des colonnes (effet de +B) et dans un but de maximiser le profit.

Les stratégies qui suivent ne sont pas nécessairement données dans un ordre de moins à plus évoluées.

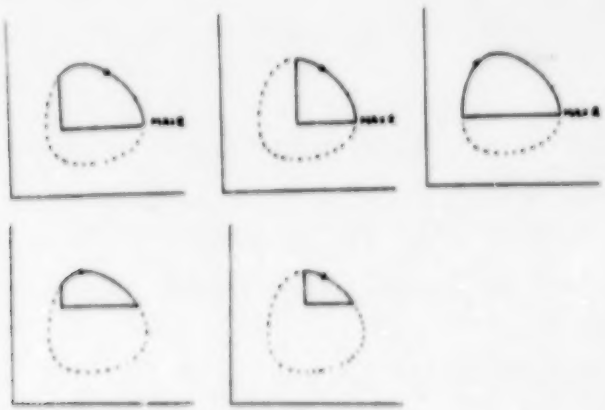
- Laisser monter R après pêche et repêcher (O1, D3).
- Faire monter R lentement par B et pêcher (D2).
- Faire monter R par B et pêcher (O1, O2, O3).
- Faire monter R plus en ajoutant plus de B (O1:Q)
- Faire monter R plus en ajoutant plus de B jusqu'à la limite de la catastrophe (O3).
- Faire monter R plus en les descendant (pêchant) jusqu'à peu: B montera plus et ensuite R montera plus (O1).
- Comme précédemment jusqu'à la limite de la catastrophe (O2).

- Faire monter le plus en ajoutant des B avec pêche restreinte fonction du profit à réaliser (D1: jeu gagnant).
- Faire monter le plus vite en pêchant quand B à la «moitié» (O3: essai exploratoire).

À l'exception de ce dernier jeu (essai exploratoire qui n'a pas été exploité à fond et dont le sens de «moitié» reste peu clair), et à l'exception des trois premiers, les autres jeux constituent des stratégies relativement efficaces, qui donnent des profits élevés qui placent les joueurs dans la compétition que crée le jeu. S'il faut établir une hiérarchie, les trois premiers jeux sont les moins productifs: ils constituent les jeux les «moins évolués». Les jeux à la limite de la catastrophe sont à l'opposé les plus évolués si on considère le but du jeu soit de maximiser le profit. Si par contre, on vise la compréhension du système dans son ensemble il faut considérer d'autres critères, le test du bonus stabilité, par exemple.

IDENTIFICATION D'UNE ZONE DE JEU

À la lumière des niveaux établis dans la partie «Contexte» (6a), il apparaît nécessaire de raffiner l'étude des stratégies qui vient d'être présentée. Ces stratégies s'accompagnent de l'identification d'une **zone de jeu** qui peut correspondre sur diagramme à l'un des patterns suivants grosso modo.



Cette identification se manifeste dans les protocoles des sujets par des indices verbaux: on identifie des états (R, B) dans lequel le système doit se trouver lorsqu'on intervient et les conséquences de ces actions en terme de **vitesse** de montée. Ceci peut être motivé par le contexte (Exemples: cf. Niveau IV dans Contexte). Toutefois, plus souvent

dans les indices verbaux on n'identifiera la zone qu'à l'aide d'une des variables, l'état des R: il faut que R soit haut (sachant qu'après R descend, ceci est suffisant).

Nous distinguons donc, encore ici, deux niveaux:

1. On identifie l'état de la population des R correspondant à une zone de jeu optimal;
2. On identifie l'état (R, B) du système correspondant à une zone de jeu optimal.

Dans les deux cas, l'identification de la zone est motivée bien sûr, indépendamment du contexte et du mouvement des colonnes, par le profit (cf. Références numériques).

Au niveau II, se trouvent presque toujours mêlées des réflexions sur les catastrophes. Celles-ci peuvent dans plusieurs cas avoir été déterminantes des stratégies. L'extrait de protocole ci-joint illustre ce niveau II. On a ici une stratégie de surpêche aux limites de la catastrophe.

Extrait de protocole: O2, L et J-F, aux questions de la fin.

I (interviewer)

L: *On s'arrange pour que les rouges soient plus bas que les bleus pour que les bleus montent plus vite.*
Ça peut être dangereux pour des risques de catastrophe.

I: *Comment expliquer votre stratégie à un autre groupe de sec. III?*

J-F: *Tu commences à expliquer le jeu, c'est les rouges qui mangent les bleus. Les bleus ne mangent pas les rouges. Alors tu laisses les bleus monter, plus il y a de bleus, plus les rouges vont monter, parce qu'ils ont plus de manger.*

L: *Là, tu manges beaucoup de rouges pour que tu en ais moins que les bleus, plus que tu pêches, plus que tu as de l'argent en caisse, et plus que tes bleus vont monter vite.*

À noter ici qu'interviennent des considérations sur la vitesse de montée. Cette caractéristique du mouvement des colonnes pourraient permettre de raffiner les stratégies de type II (dites évoluées).

APPENDICE 5b

STRATÉGIES DE CHACUNE DES ÉQUIPES DE SECONDAIRE III POUR L'ENSEMBLE DE L'EXPÉRIMENTATION

Dans ce qui suit nous utilisons certains codes selon la légende suivante:
R: poissons rouges
B: poissons bleus
+: ajouter ou ensemencer
-: enlever ou pêcher

Équipe D1

Stratégie de jeu sur colonnes et sur diagramme:

Faire monter R le plus possible en ajoutant des B avec recherche du maximum de B à ajouter pour ne pas avoir de catastrophe. Ne pas pêcher plus bas qu'un certain seuil fonction du profit à réaliser.

Type +B Courbe extérieure
-R

Stratégie établie depuis le début. Même pattern sur jeu colonnes et sur jeu diagrammes avec préférence pour le diagramme (parce qu'il donne des repères).

Extrait de protocole (en réponse aux questions après jeux):

«Équilibrer les deux. Faut pas mettre trop haut pour que... Pêcher pas moins de 200$ les R. Après il faut augmenter les B.»
«Le diagramme ... quand ça monte, le diagramme, on voit jusqu'où ... tandis que l'autre, on peut pas ... équilibrer les deux.»

Résultat au jeu de la stabilité: échec complet

Commentaire

Cette équipe qui travaille dans une région très limitée du diagramme de phase, sur jeu ordinaire et sur jeu diagramme, n'arrive pas à réaliser la stabilité! On pouvait s'y attendre.

Équipe D2 (T et D)

1re partie: sur colonnes

Stratégies:
Exploitation inconsidérée des R

Stratégies sur colonnes

Pêche au maximum des R
Ajout de R
Ajout de B
-Compenser-
Laisser monter R

↓

dernier jeu:
faire monter
le pattern reste le même

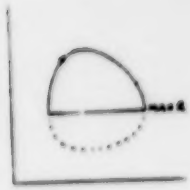
↓

2e partie interférence

Stratégies sur diagramme

Pêche au maximum R
On laisse aller

↓



Dans les réponses aux questions de la fin

faire monter plus en ajoutant
plus de B mais peur de la catastrophe
alors

↓

faire monter lentement
compensation R-B
alors

faire lever (pas appliqué)

laisser avancer

Extrait de protocole (en réponse à des questions, à la fin sur le jeu colonnes):

T: *«À chaque fois qu'on pêche ben les R ils diminuent, ça fait qu'on jette des R.»*
«Jeter des B pour que les R puissent manger. Jeter un peu de R pi un peu plus de B.» (...)

I (interviewer)
ça coûte cher?
T: *«Ouais mais on en jette juste un peu.»*
D: *«Parce que si on ajoute trop de B, on peut avoir une catastrophe.»*
«Le mieux qu'on fait, c'est de ne pas toucher aux R. Juste toucher un peu aux B, c'est tout et laisser avancer tout seul.»

Résultat au jeu de la stabilité: aucune réussite

Stratégie: Faire monter R haut puis laisser descendre entre les deux lignes blanches et vérifier. On retrouve dans le bonus la stratégie primitive "-R +R": sans aucune préoccupation des B.

Commentaire

Cette équipe joue deux jeux différents sur diagramme et sur colonnes. Au jeu de la stabilité, on retrouve chez cette équipe un retour à la stratégie de démarrage du jeu ordinaire, on ne se préoccupe pas des bleus.

Équipe D3 *(G et D)*

1re partie: sur colonnes

Stratégies:
Exploitation inconsidérée des R avec «pitonnage»
et exploration aléatoire du jeu

↓

Ensemencement des B avec maintien de l'ensemencement des R
et laisser monter R et descendre B

Stratégie
sur colonnes
Abandon de +R *
Jeu près de la stabilité

2e partie

Stratégie
sur diagramme
Exploration sur courbes
de plus en plus extérieures
avec retour à l'intérieur etc.
avec éventuellement
abandon de +R

↓

Tentative à la fin de
systématisation dans le nombre
de pêches et d'ajouts de B

(*Abandon de +R découle du «laisser aller» demandé par l'observateur.)

Dans l'ensemble, l'évolution est amenée par interventions de l'observateur. Reste toutefois des retours à la stratégie de départ. L'action sur diagramme reste indépendante des positions sur la courbe.

Résultat et stratégie au jeu de la stabilité

Cette équipe paraît avoir une certaine maîtrise du jeu bonus: 8 réussites/14 essais.

1re stratégie: pêche avec quelques ajouts de B: 4 réussites sur 10

Suite à une question de l'observateur, elles disent que les rouges montent parce qu'il y a trop de B mais elles disent aussi ne pas avoir regarder les B. L'observateur incite à le faire. Elles réussissent.

2e stratégie: pêche et ajout de R: réussi.
3e stratégie (à la demande de l'observateur): +B seulement: 2 réussites/2 essais.

Elles expliquent:

G: *les rouges suivent les bleus.*

D: *les bleus, pas en mettre trop pour garder les rouges bas et en mettre s'ils sont trop bas*

Commentaire

Cette équipe qui réussit assez bien le jeu de la stabilité joue au jeu ordinaire près de cette stabilité!

Équipe 01 (U et E)

Sur colonnes seulement

Stratégies;
Exploitation inconsidérée des R
↓(*)
Pêche quand R monte, suivi de +R et +B
et laisser aller en attendant que R monte
Pêche «bas»
Stratégie de compensation du mouvement des colonnes:
cycle de petite amplitude
↓
Abandon de +R (pas besoin de compenser)
On laisse monter et on pêche
On pêche moins bas et on ajoute B quand B ne montent pas seul
(quand on est près de la stabilité)
↓ (**)
Cycle d'amplitude plus grande:
on pêche plus mais pas autant qu'au début
Pêche au maximum
+B pour faire monter R quand ça remonte pas tout seul

* La couleur du lac paraît ici déterminante.
** Il semble y avoir une interprétation particulière du mouvement des colonnes en association avec les points (profits) qui déterminerait le jeu sur une courbe plus extérieure!

Extrait de protocole (en réponse aux questions de la fin):

U: *«Faut que tu pêches. Faut que tu stabilises ton R par rapport à ton B pis ton B par rapport à ton R pour pas qu'i monte trop. Pi si le B monte ben tu vois le R qui monte parce que le R mange le B. Si le B descend ben là tu mets des B pour nourrir le R. Pis là ben si t'as du R tu peux pêcher pis tu fais de l'argent.»*

E: *«Parce que vu que le R mange le B ben faut tout le temps qu'i ait plus de B pour que le R puisse manger plus pis que tu fasses de l'argent.»*

Résultat au bonus: Quelques réussites (2/6 par pêche, 0/2 par pêche avec ajout de R). Il ont peu de succès mais ils identifient au moins une stratégie correcte, par pêche:

«Laisse-le (R) *monter un peu pour que lui baisse* (B).
Laisse-le monter un peu plus haut.
O.K. pêche. Pêche. Fais-le (R) *descendre jusque là.»*

Par ailleurs un des joueurs suggère l'ajout de bleus *«mets du bleu (...) parce qu'il faut que ça baisse mais rien n'est tenté»*.

Équipe O2 (L et J-F)

Sur colonnes seulement

Stratégies:
Pêcher très «bas» et laisser monter B et R
↓
Laisser monter et
Faire monter en ajoutant des B pour accélérer la montée des R
Pêche au maximum des R
↓
Faire monter le plus possible en pêchant «bas»
pour que B monte et ensuite R ou parfois en ajoutant des B

Résultat au bonus: Meilleur bonus par pêche: 3 réussites/6 dont deux de 50%.

Dans les réponses au questions de la fin, on explique:

I (interviewer)
L: *«Plus les rouges montaient, plus les bleus descendaient, quand ils (les B) étaient à peu près au milieu, on descendait les rouges et on vérifiait. (...) »*
J-F: *«Quand tu pêches trop, les bleus montent trop.»*
I: *«À quel moment décidiez-vous de pêcher les rouges?»*
L: *«Quand les bleus se trouvaient entre les deux barres.»*

À la demande de l'interviewer, deux autres stratégies sont données. La première consiste à ajouter des rouges pour faire descendre les bleus, lorsque les rouges sont bas et les bleus plus hauts. Cette stratégie n'a pas été essayée, semble-t-il, d'après les protocoles. La deuxième, essayée sans succès, consiste à ensemencer des bleus quand les bleus constituent la population la plus basse. J.F. constate: *«C'est beaucoup trop dure, car les rouges augmentent tout le temps quant tu ensemences des bleus.»*

Commentaire

Cette équipe obtient une bonne performance au jeu de la stabilité en utilisant une stratégie de pêche.

Sa stratégie au jeu ordinaire consiste en une surpêche pour faire monter le plus possible; si par erreur ou peur elle pêche moins, elle ajoute des B pour faire monter plus. Cette équipe a appris à contrôler le mouvement des colonnes par les pêches en particulier. Elle a constaté, il nous semble, l'existence de différents cycles dans l'ampleur variable des oscillations. Elle a aussi observé la stabilité, lors du jeu ordinaire.

Cette équipe a de la difficulté à réaliser la stabilité autrement que par pêche. En fait, elle paraît s'accrocher à un effet des bleus sur les rouges indépendamment des états, conséquence sans doute d'un jeu dans une zone du diagramme de phase qui reste limitée.

Équipe O3 (D et Y)

Sur colonnes seulement

Stratégies:
Laisser monter et faire monter les R (+R ou +B)
↓
Faire monter en ajoutant des B seulement
↓
Faire monter le plus et pêcher

Cette équipe fait plusieurs essais exploratoires en vue d'atteindre un score plus élevé.

Résultat au bonus: quelques réussites (3/6 par pêches)

Ils recherchent l'égalité des colonnes. Ils attendent que les bleus arrivent entre les lignes blanches et pêchent. D dit: «*Quant i en a pas gros i mange pas gros. Quand i en a beaucoup si i est dans le bas i va en manger plus*». Il se réfère, pensons-nous, à l'amplitude du cycle. Aux questions de la fin, D et Y disent cependant n'y rien comprendre. A la demande de l'interviewer, ils font deux autres essais en ajoutant des bleus, mais sans succès.

Commentaire

O3 réussit assez bien à jouer le bonus en utilisant une stratégie de pêche quoiqu'elle manifeste une certaine confusion face au jeu bonus.

Dans le jeu ordinaire, cette équipe explore beaucoup. Elle a tenté entre autres d'égaliser les colonnes peut-être sous l'influence du bonus (joué après chaque jeu ordinaire). Comme la précédente, cette équipe avait sans doute par ailleurs, constaté l'effet de pêche «basse»: elle a eu quelques catastrophes causées par cette surpêche: «*ça va être une catastrophe, les poissons rouges ne sont plus capables de manger*».

Dans le jeu ordinaire cette équipe contrôle assez bien le mouvement des colonnes et peut avoir constaté aussi l'existence de plusieurs cycles dans leur ampleur.

Des exemplaires du présent document sont en vente à l'adresse suivante:

Centre Interdisciplinaire de Recherche sur
l'Apprentissage et le Développement en Education
Université du Québec à Montréal
C.P. 8888, Succ. A,
Montréal, Québec
H3C 3P8

Publié par le Centre Interdisciplinaire de Recherche
sur l'Apprentissage et le Développement en Education
Université du Québec à Montréal
Conception graphique: Pierrette Thivierge